

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta lesnická a dřevařská

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů



**Fakulta lesnická
a dřevařská**

**Zhušťování dřeva a jeho dopad na povrchové
vlastnosti**

Bakalářská práce

Autor: Ondřej Škoda

Vedoucí práce: Ing. Adam Sikora, Ph.D.

2024

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta lesnická a dřevařská

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Ondřej Škoda

Dřevařství
Zpracování dřeva

Název práce

Zhušťování dřeva a jeho dopad na povrchové vlastnosti

Název anglicky

Densification of wood and its effect on surface properties

Cíle práce

Cílem této bakalářské práce je analýza vlivu procesu zhušťování dřeva na změnu vybraných povrchových vlastností. Práce bude zpracovaná na základě experimentálních měření dle platných norem. Budou použity různé stupně zhuštění dřeva. Na zhušťovaném dřevě budou následně vyhodnocovány vlastnosti jako je tvrdost, kvalita povrchu a smáčivost.

Metodika

Metodika:

1. Literární rozbor problematiky zhušťování dřeva
2. Navržení metodiky tvorby zkušebních těles a jejich testování,
3. Experimentální zjištění vlivu zhuštění dřeva na vybrané vlastnosti,
4. Statistické vyhodnocení
5. Členění práce – úvod, cíl práce, literární rozbor, výsledky, diskuse, závěr, použitá literatura a souhrn.

Harmonogram řešení práce:

1. Konceptní řešení práce (odevzdání do 1.10. 2023).
2. Analýza problematiky s důrazem na téma práce (odevzdání do 1.12. 2023).
3. Praktická část práce (odevzdání do 1.2. 2024).
4. Zpracování výsledků (odevzdání do 15.2. 2024).
5. Závěr (odevzdání do 1.3. 2024).

Doporučený rozsah práce

30 – 40 stran

Klíčová slova

Zhušňování; Tvrdost; Smáčivost; Kvalita povrchu

Doporučené zdroje informací

- Bekhta, P., Proszyk, S., Krystofiak, T., Sedliacik, J., Novak, I., a Mamonova, M. (2017). "Effects of short-term thermomechanical densification on the structure and properties of wood veneers", *Wood Material Science and Engineering*, 12 (1), 40-54. DOI: 10.1080/17480272.2015.1009488.
- Bodig, J., a Jayne, B. A. (1982). „Mechanics of Wood and Wood Composites,“ Van Nostran-Reinhold CO, Inc., New York, pp. 712. ISBN: 0-89464-777-6.
- Horaček, P. (2008). "Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva I," Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně. ISBN: 978-80-7375-169-2.
- Kutnar, A., Kamke, F. A., Petrič, M., a Sernek, M. (2008). "The influence of viscoelastic thermal compression on the chemistry and surface energetics of wood", *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 329 (1), pp. 82-86. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2008.06.047
- Požgaj, A., Chovanec, D., Kurjatko, S., a Babiak, M. (1993). „Štruktúra a Vlastnosti Dřeva,“ Příroda a. s., Bratislava, Slovakia. pp. 486.

Předběžný termín obhajoby

2023/24 LS – FLD

Vedoucí práce

Ing. Adam Sikora, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů

Elektronicky schváleno dne 9. 5. 2023

doc. Ing. Roman Fojtík, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 28. 7. 2023

prof. Ing. Róbert Marušák, PhD.

Děkan

V Praze dne 21. 03. 2024

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma: Zhušťování dřeva a jeho dopad na povrchové vlastnosti vypracoval samostatně a citoval jsem všechny informační zdroje, které jsem v práci použil, a které jsem rovněž uvedl na konci práce v seznamu použitých informačních zdrojů.

Jsem si vědom, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.

Jsem si vědom, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Svým podpisem rovněž prohlašuji, že elektronická verze práce je totožná s verzí tištěnou a že s údaji uvedenými v práci bylo nakládáno v souvislosti s GDPR.

V Praze dne 1.4.2024

Poděkování

Děkuji především svému vedoucímu práce Ing. Adamovi Sikorovi, PhD za jeho odborné vedení, trpělivost, čas a veškeré odborné rady. Také bych chtěl poděkovat své rodině a svým přátelům, kteří mě po celou dobu studia a psaní bakalářské práce podporovali a dodávali mi víru, motivaci a energii.

Zhušťování dřeva a jeho dopad na povrchové vlastnosti

Souhrn

Tato práce je zaměřená na termomechanické zhušťování bukového dřeva a jeho následný dopad na vybrané vlastnosti. Cílem je zjistit, jaký má proces zhušťování vliv na smáčivost povrchu, tvrdost a na vybrané charakteristiky povrchu, které reprezentují parametry drsnosti Ra, Rz, RSm a parametr vlnitosti Wa. Tyto vlastnosti byly zkoumány napříč různými úrovněmi zhuštění. Zkušební vzorky byly zhuštěny o 5, 10, 15 a 20 % v tangenciálním směru po tloušťce. Povrchové vlastnosti obecně mají význam zvláště při procesu lepení a při povrchových úpravách. Bylo zjištěno že s narůstajícím stupněm zhuštění dochází k poklesu drsnosti a vlnitosti, a povrch se tak stává hladší. Zhuštěný, a tedy hladší povrch ovlivnil také smáčivost, kde docházelo převážně ke snižování kontaktních úhlů. Tvrdost se s narůstajícími stupni zhuštění zvyšovala, přičemž mezi předposledním a posledním stupněm nenastal nárůst tvrdosti, zde ovšem nebyla prokázána statistická významnost. Tato práce je rozdělená na část teoretickou, ve které je podrobněji popsána problematika zhušťování dřeva a na část praktickou která z této popsané problematiky vychází.

Klíčová slova: Zhušťování dřeva, buk, povrchové vlastnosti, tvrdost, drsnost, vlnitost, smáčivost

Densification of wood and its effect on surface properties

Summary

This work focuses on the thermomechanical densification of beech wood and its subsequent impact on selected properties. The aim is to investigate the effect of the densification process on surface wettability, hardness and on selected surface characteristics represented by roughness parameters Ra, Rz, RSm and waviness parameter Wa. These properties were investigated across different levels of densification. The test specimens were densified by 5, 10, 15 and 20 % in the tangential direction along the thickness. Surface properties in general are of particular importance in the bonding process and in surface treatments. It was found that with increasing degree of densification, roughness and waviness decrease and the surface becomes smoother. The denser and therefore smoother surface also affected the wettability, where the contact angles were predominantly reduced. Hardness increased with increasing degrees of densification, with no increase in hardness between the penultimate and last degree, but no statistical significance was shown here. This thesis is divided into a theoretical part in which the problem of wood densification is described in detail and a practical part which is based on this described problem.

Keywords: Densification of wood, beech, surface properties, hardness, roughness, waviness, wettability

Obsah

Seznam tabulek	10
Seznam obrázků	11
Seznam symbolů a zkratek	12
Úvod	1
Cíl práce	2
1. Zhušťování dřeva	3
1.1. Význam zhušťování dřeva	3
1.2. Historie a vývoj zhušťování dřeva	4
1.3. Metody zhušťování	5
1.3.1. Mechanické zhušťování	5
1.3.2. Termomechanické zhušťování	6
1.3.3. Termohydromechanické zhušťování	7
1.3.4. Vysokotlaké zhušťování dřeva	8
1.3.5. Zhušťování s plastifikací pomocí mikrovln	8
1.3.6. Zhušťování s použitím chemie	8
1.4. Zhušťování dřeva ve vztahu ke struktuře dřeva	10
1.5. Důležité jevy v návaznosti na proces zhušťování	13
1.5.1. Náhlé zpětné odpružení	13
1.5.2. Odpružení zpětné v čase	13
1.5.3. Relaxace napětí	14
1.6. Průmyslové využití zhušťovaného dřeva	14
2. Fyzikální vlastnosti ve vztahu ke zhušťování dřeva	16
2.1. Hustota dřeva	16
2.2. Vlhkost dřeva	17
2.3. Drsnost povrchu	18
2.4. Vlnitost profilu	18
2.5. Smáčivost povrchu	19
2.5.1. Youngův model smáčivosti	20
2.5.2. Měření smáčivosti pomocí kontaktního úhlu	21
3. Tvrdost dřeva	22
3.1. Měření tvrdosti dřeva dle Brinella	22
3.2. Měření tvrdosti dřeva dle Janka	24
4. Metodika	25
4.2. Zhušťování zkušebních vzorků	26
4.3. Výroba a označení zkušebních těles	26

4.4.	Měření drsnosti a vlnitosti.....	27
4.4.1.	Filtrování profilu	28
4.4.2.	Měření zkušebních vzorků	28
4.5.	Měření smáčivosti	30
4.6.	Měření tvrdosti	31
5.	Výsledky a diskuse	32
5.1.	Vyhodnocení hustoty a tvrdosti podle Brinella	32
5.2.	Vyhodnocení smáčivosti povrchu metodou přisedlé kapky	34
5.3.	Vyhodnocení drsnosti povrchu	36
5.4.	Vyhodnocení vlnitosti povrchu	39
	Závěry a přínosy.....	41
	Přehled literatury a použitých zdrojů	43
	Seznam příloh.....	49

Seznam tabulek

Tabulka č. 1 Tloušťky vzorků před a po zhuštění	26
Tabulka č. 2 Doba zhuštění pro příslušné stupně	26
Tabulka č. 3 Hustota zkušebních vzorků před a po zhuštění.....	32
Tabulka č. 4 Závislost mezi stupni zhuštění a tvrdostí.....	33
Tabulka č. 5 Závislost mezi stupni zhuštění a kontaktními úhly.....	35
Tabulka č. 6 Závislost mezi stupni zhuštění a parametrem drsnosti Ra.....	36
Tabulka č. 7 Závislost mezi stupni zhuštění a parametrem drsnosti Rz.....	37
Tabulka č. 8 Závislost mezi stupni zhuštění a parametrem drsnosti RSm	39
Tabulka č. 9 Závislost mezi stupni zhuštění a vlnitostí	40

Seznam obrázků

Obrázek č. 1 Zhušťování celo objemové a povrchové	5
Obrázek č. 2 Rozdělení procesu mechanického zhušťování dřeva	9
Obrázek č. 3 Schéma buněčné stěny	10
Obrázek č. 4 Mikrosnímky zhuštěných a nezhuštěných dých	12
Obrázek č. 5 Zhuštěné dřevo (Permali).....	15
Obrázek č. 6 Porovnání adheze a koheze v lepeném spoji.....	19
Obrázek č. 7 Schematické znázornění Youngova modelu smáčení.....	20
Obrázek č. 8 Schématické znázornění měření tvrdosti podle Brinella.....	23
Obrázek č. 9 Schématické znázornění měření tvrdosti podle Janka	24
Obrázek č. 10 Rozměry zkušebních vzorků	25
Obrázek č. 11 Zkušební vzorky rozdělené do skupin dle stupně zhuštění	27
Obrázek č. 12 Naznačení směru měření drsnosti a vlnitosti podél vláken.....	28
Obrázek č. 13 Měření drsnosti a vlnitosti metodou doteku pomocí hrotu na zařízení Taylor Hobson Form Talysurf 50	29
Obrázek č. 14 Vybraný reprezentativní výstup parametru Ra u vzorku zhuštěného o 20 %.....	29
Obrázek č. 15 a 16 Nanášení kapek na povrch vzorku a pořízený snímek měření kontaktního úhlu dynamickou kapkovou metodou	30
Obrázek č. 17 Schématické znázornění přibližných bodů měření tvrdosti	31
Obrázek č. 18 Měření tvrdosti Brinellovou metodou na zařízení DuraVision-30.....	31
Obrázek č. 19 Závislost mezi jednotlivými stupni zhuštění a tvrdostí.....	33
Obrázek č. 20 Závislost mezi jednotlivými skupinami zhuštění a kontaktními úhly...	34
Obrázek č. 21 Závislost mezi jednotlivými skupinami zhuštění a parametrem drsnosti Ra.....	36
Obrázek č. 22 Závislost mezi jednotlivými skupinami zhuštění a parametrem drsnosti Rz.....	37
Obrázek č. 23 Závislost mezi jednotlivými skupinami zhuštění a parametrem drsnosti RSm	38
Obrázek č. 24 Závislost mezi jednotlivými skupinami zhuštění a vlnitostí povrchu ...	40

Seznam symbolů a zkratek

Ra	Aritmetická odchylka profilu drsnosti
Rz	Průměrná hloubky drsnosti
RSm	Délkový parametr značící průměrnou šířku prvků profilu
Wa	Aritmetická odchylka profilu vlnitosti
°C	Stupeň celsia
Kg/cm ²	Kilogram na centimetr čtverečný
MPa	Megapascal
GPa	Gigapascal
NaOH	Hydroxid sodný
MDF	Polotvrdá dřevovláknitá deska
Kg*m ⁻³	Kilogram na metr krychlový
N	Newton
mm	Milimetr
Wz	Výška zvlnění profilu
Sw	Rozteč zvlnění profilu
2D	Dvoudimenzionální
3D	Trojdimenzionální
ČSN	Česká technická norma
EN	Evropská norma
ISO	Norma Mezinárodní organizace pro normalizaci
č.	Číslo
μl	Mikrolitr
μm	Mikrometr
NP	Normal probability plot
Q-Q	Quantile-quantile plot
GHz	Gigahertz
kW	Kilowatt
CO ₂	Oxid uhličitý
cm ²	centimetr čtverečný
mm ²	milimetr čtverečný

Úvod

Všechny materiální věci, které lidstvo vyprodukuje počínají těžbou přírodních zdrojů a končí likvidací. Jedinečnou skutečně obnovitelnou a udržitelnou surovinou je dřevo (www.sustainablelumberco.com 2017). Už od pradávna je dřevo považováno za materiál nejrozšířenější a nejvšestrannější. Tento přírodní produkt je dostupný, snadno opracovatelný a skrývá celou řadu pozitivních vlastností (Požgaj a kol. 1993). V důsledku současné energetické krize je snaha snižovat dopad na životní prostředí, dochází k omezování závislosti na fosilních materiálech a stále více jsou podporovány materiály přírodní které jsou dlouhodobě udržitelné a recyklovatelné. (Schwarzkopf 2021). Dřevo má ovšem i svá úskalí, je to materiál s anizotropním, hygroskopickým a heterogenním charakterem. Pro náročné aplikace a použití, dřevo často nesplňuje požadované nároky. Byly proto vyvinuty různé způsoby modifikace, díky kterým může vzniknout vylepšený produkt s celou řadou nových vlastností (Atilgan 2024).

Mezi tyto způsoby modifikace, se řadí také proces zhušťování dřeva, který je hlavním tématem této práce. V této práci je konkrétně použita termomechanická metoda zhušťování dřeva, která využívá zvýšené teploty a tlaku bez úplné plastifikace. Tato metoda je účinná převážně díky své jednoduchosti (Neyses 2016). Hustota je brána jako jedna z nejdůležitějších vlastností dřeva, protože se od ní odvíjí většina mechanických vlastností. Dřevo, které má větší hustotu je obecně vyžadováno pro konstrukční aplikace a do míst s většími nároky na odolnost (Kutnar a Šernek 2007). V této práci je zkoumána tvrdost, smáčivost, drsnost a vlnitost povrchu a u všech těchto vlastností je očekávána pozitivní změna v důsledku procesu zhutnění. Výzkum je v této práci proveden na bukovém dřevě. Buk lesní je nejrozšířenější listnatá dřevina v České republice (www.uhul.cz 2022). Obecně dřeviny středně nebo méně kvalitní by mohly být lépe zhodnocovány a využívány díky procesu zhušťování (Luan a kol. 2022).

Význam této práce spočívá v základní analýze změn zmíněných vybraných vlastností bukového dřeva, které bylo zhutněno pomocí termomechanické metody. Výsledky této práce mohou dále posloužit jako podklad pro další a rozsáhlejší výzkum v této oblasti.

Cíl práce

Cílem této práce je analýza vlivu různých úrovní zhuštění na vybrané charakteristiky bukového dřeva. Zkušební vzorky byly tloušťkově zhuštěny v tangenciálním směru na jednotlivé úrovně o 5, 10, 15 a 20 %. Zkoumána byla tvrdost metodou podle Brinella za pomoci dílenského tvrdoměru. Dále byly zkoumány vybrané charakteristiky drsnosti (R_a , R_z , R_{Sm}) a také vlnitost profilu (W_a). Drsnost a vlnitost byla měřena pomocí kontaktního profilometru ve směru podél vláken. Zjišťována byla také smáčivost povrchu, která byla měřena metodou přisedlé kapky za pomoci kontaktního úhlu.

1. Zhušťování dřeva

1.1. Význam zhušťování dřeva

V porovnání s jinými materiály, jako je například plast nebo beton, má dřevo nejen velkou pevnost a nízkou cenu, ale především se jedná o obnovitelný materiál, který je šetrný k životnímu prostředí. Většina dřevin má pouze střední nebo nízkou mechanickou pevnost, a proto nejsou vhodné do míst s náročnějšími pevnostními požadavky. Vysokopevnostní dřeviny jsou mnohdy velice vzácné a drahé, a proto se hledají alternativní způsoby, jak z běžných nebo i méně hodnotných dřevin s rychlým růstem a krátkým koloběhem, dosáhnout materiálu s lepší mechanickou pevností. Pevnost dřeva pozitivně koreluje s jeho hustotou, z tohoto důvodu bylo vyvinuto a vyzkoušeno mnoho úprav pro zvýšení hustoty dřeva, a tedy následné zvýšení pevnosti dřeva (Luan a kol. 2022).

Hustota dřeva je brána jako jedna z nejdůležitějších vlastností dřeva (Morsing 1998). Objemová hmotnost neboli hustota souvisí s téměř všemi mechanickými vlastnostmi. Zhuštěné dřevo tak dosáhne i vyšší tvrdosti (Kutnar a Šernek 2007). Mezi další důležité vlastnosti, které se uplatňují převážně ve stavebnictví, se řadí také odolnost a tvrdost, tyto vlastnosti se opět zvýší díky procesu zhušťování. Ve zhuštěném dřevě, vlivem zvýšení hustoty, dojde k zhroucení buněčné stěny, materiál se zhutní a dojde k snížení prázdného objemu, a díky tomu se snižuje hygroskopičnost v materiálu, také dojde k zvýšení odporových vlastností. Rovněž dochází k progresivitě povrchových vlastností, mezi které se řadí drsnost a smáčivost povrchu (Atilgan a kol. 2024).

V posledních desetiletích nastává otázka, zda může takto modifikované dřevo nahradit železné a neželezné kovy, některé druhy plastu nebo například textolit. Výrobu těchto konstrukčních materiálů doprovází spotřeba velkého množství surovin, které se již neobnovují a dochází k jejich vyčerpávání. Většina stavebních výrobků je také spojena s náročnou energetickou výrobou, na kterou je v současné době kladena ještě větší pozornost. Zhušťování dřeva je proto nově vznikající technologie s produkty, které dosahují výrazné zlepšení vlastností. O tyto modifikované produkty je stále větší poptávka v důsledku rozvoje těžebního průmyslu, těžby ropy a zemního plynu (Rudak a kol. 2021).

1.2. Historie a vývoj zhušťování dřeva

Zhušťování dřeva mechanickým způsobem bylo zkoumáno již více než 100 let. V roce 1900 požádat Sears o první patent na dřevěný výrobek upravený procesem zhutnění. Ve 20. a 30. letech 20. století došlo k dalšímu vývoji a setkáme se zde se jmény jako Olsen, Esselen, Watts nebo Oleheimer. Mezi roky 1930 až 1950 se používali některé obchodní názvy lisovaného dřeva jako například Staypak, Lignifol a Lignostone. Tyto zhuštěné produkty měli své úskalí, a to hlavně v horší rozměrové stálosti a větší citlivosti na vlhkost. Některé výrobky mohli téměř navrátit své původní rozměry vlivem opětovného navlhčení a zahřátí (Luan a kol. 2022).

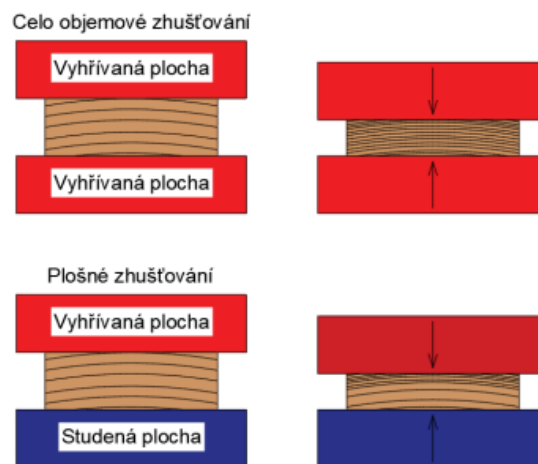
Zmíněný Staypak, pochází ze Spojených států z období druhé světové války a jedná se o tepelně stabilizované stlačené dřevo, které je během procesu lisování zahřáté (Seborg a kol. 1956, Bejšák 2022). Produkt Lignostone vznikl v Německu, poté co byl prozkoumán vliv tepla a vody na plastifikaci dřeva. V tomto případě se opět jedná o metodu zhušťování dřeva spojenou s vyšší teplotou. Jedná se o velmi jednoduchý proces, ve kterém se dřevěné vzorky umístí do hydraulického zvedáku, který má tlak až 250 kg/cm^2 , desky, mezi kterými je dřevěný prvek umístěn jsou vyhřáté až na teplotu $140 \text{ }^\circ\text{C}$. Dřevěné vzorky jsou nejprve stabilizovány na přibližnou vlhkost 13 %, to je z důvodu vyloučení rizika výbuchu během zpracování. Tato popsána metoda se nazývá termomechanické zhušťování dřeva, a mezi její hlavní nevýhody se řadí horší stabilita a možná návratnost vzorku do původní polohy (Heger a kol. 2004).

Veliký rozvoj v dřevařském průmyslu byl zaznamenán koncem 20. století. Bylo prováděno spousta nových výzkumů v návaznosti na zhušťování dřeva a došlo tak k rozšíření znalostí a kompresních technologií. Byla například vyvinuta technologie zhutňování dřeva, která využívá kombinaci tepla, tlaku a přidávané páry. Nejedná se o páru, která vzniká odpařováním vody ze samotného dřeva, jsou zde speciální systémy na výrobu páry, kterými se toto médium dodává na zhušťovaný vzorek. Díky přiváděné páře dochází k účinnému změkčení dřeva, dojde k rychlejšímu zvýšení teploty uvnitř dřevěného vzorku, a dokonce se zvýší mechanické vlastnosti a sníží se zpětné odpružení a deformace. Také se vytvořil názor, že horká pára může mít degradační účinky na hemicelulózy, a tím může dojít ke zlepšení rozměrové stability (Luan a kol. 2022).

1.3. Metody zhušťování

Zhušťování může probíhat v různých směrech s ohledem na dřevní vlákna, jedná se o směr podélný a směr příčný. Nejčastěji se zhutňování dřeva provádí ve směru příčném, kde se ještě následně směry klasifikují na radiální a tangenciální. V podélném směru by vznikly záhyby, a to by vedlo ke značným škodám v mikroměřítku. Velmi důležité faktory jsou také vlhkost a teplota, respektive jejich vzájemná interakce. (Sikora 2021, Luan a kol. 2022, Bejšák 2022).

Dále můžeme zhušťování dřeva rozdělit na tzv. celo objemové a povrchové. Rozdíl mezi těmito dvěma způsoby spočívá v rozdílném hustotním profilu. V případě povrchového zhuštění, nám hustotní profil ukáže výkyvy způsobené větší hustotou pouze v povrchové vrstvě. U celo objemového zhuštění je hustotní profil rovnoměrnější, tak jako u nezhuštěného dřeva (Sikora 2021).



Obrázek č. 1 Zhušťování celo objemové a povrchové (Sikora 2021)

1.3.1. Mechanické zhušťování

V této metodě se lisování provádí při běžných podmínkách a bez jakékoliv úpravy (Bejšák 2022). Sicalern a kol. (2021) provedli experiment při kterém bylo zhušťováno dřevo z kaučuku za různých podmínek při lisování, jednou z podmínek bylo také lisování bez zvýšené teploty, tedy mechanické zhušťování. Vzorky, které se zhušťovali pouze mechanickým způsobem měli před lisováním vlhkost 12 % dosaženou pomocí solární pece. Tloušťka vzorků v tomto experimentu byla 15 a 50 mm a lisovací tlak se zvyšoval nepřetržitě až do zhroucení vzorku. Experiment nám potvrdil že ve

všech metodách zhuštění, které byly prováděny, došlo ke stlačení a snížení na určitou tloušťku. Konkrétně při mechanickém zhuštění nebyla dosažena taková účinnost jako při zhuštění za pomoci zvýšené teploty. U lisování za studena u vzorků s tloušťkou 50 mm došlo ke 14,19 % stlačení. Stejně velké a stejně stlačované vzorky, které byly ovšem zhutňovány za teploty 130 °C dosáhli z původních rozměrů stlačení o 18,9 %.

1.3.2. Termomechanické zhušťování

Pod pojmem termomechanické zhušťování se rozumí kombinování komprese s teplem (Fang a kol. 2019). Teplo vzniká díky vyhříváním plotnám hydraulického lisu, mezi kterými jsou umístěny dřevěné vzorky (Laskowska 2020, Bejšák 2022). Dřevěné vzorky jsou následně stlačeny pod určitým tlakem, po určitou dobu a při určité teplotě.

Bekhta a kol. (2017) provedli experiment ve kterém byly krátkodobě termomechanicky zhušťovány 1,5 mm tlusté dýhy z olše, buku lesního, břízy a borovice lesní. Dýhy byly vyrobeny metodou loupáním, a měli vlhkost 5 % před lisováním. V tomto experimentu byl zjišťován dopad krátkodobého termomechanického zhušťování na drsnost povrchu, smáčivost a úbytek hmoty. Každý vzorek byl zhuštěn mezi dobře očištěnými hladkými deskami laboratorního lisu s otevřeným systémem. Teploty byly 100 °C, 150 °C a 200 °C a lisovací tlaky byly 4 MPa, 8 MPa a 12 MPa. Doba zhuštění činila pouze 4 minuty. Po zhutnění byly vzorky odebrány z horkého lisu a byly přirozeně ochlazeny na pokojovou teplotu. Nejvíce zhuštěné dřeviny byly dřeviny s nejmenší počáteční hustotou tedy olše a borovice. Mezi teplotami 100 °C a 150 °C nebyl pozorován žádný významný rozdíl. Ukázalo se, dle výsledků ANOVA že tlak má na zhuštění významnější vliv než teplota. Největší kontaktní úhel kapkou vody, byl zaznamenán u borovice (průměrně 56,2 °) a nejmenší kontaktní úhel byl zaznamenán u bukového dřeva (průměrně 31,8 °). V případě drsnosti došlo k výraznému snížení, a to hlavně u zhušťování při teplotě 200 °C. Hodnoty tloušťky a kontaktního úhlu byly stabilní po dobu 24 hodin po slisování, za předpokladu že vzorky byly vystaveny normálním atmosférickým podmínkám.

1.3.3. Termohydromechanické zhušťování

V této metodě se při zhutňování dřeva využívá kombinace tlaku, tepla a páry. Dodávaná pára může dřevo výrazně změkčit a také může dojít k rychlejšímu zvýšení teploty uvnitř dřeva. V porovnání s termomechanickým procesem zhušťování může tato metoda vykazovat výraznější zlepšení mechanických vlastností, ale především se snižuje míra zpětného odpružení (Luan a kol. 2022). Velmi důležitý je proces plastifikace, který může být proveden více způsoby. Dřevo může být například v nasycené páře při zvýšené teplotě kolem 160 °C, přičemž celý proces je proveden v uzavřeném systému (Sikora 2021). Pára může být přiváděna před kompresí nebo před i současně v procesu komprese. Bylo vyvinuto speciální utěsněné zařízení, ve kterém bylo možné dřevo lisovat a zároveň dodávat vysokotlakou páru (Luan a kol. 2022). Sikora (2021) Uvádí zajímavou metodu plastifikace, která pracuje na principu tření. Tření probíhá za nízkého tlaku v povrchových vrstvách dvou kusů dřeva proti sobě. Aby nedošlo k nežádoucímu svaření dřeva bylo použito vrstvy slunečnicového oleje. Po povrchové plastifikaci způsobené pohybem vzorků vůči sobě, který trval okolo 8 až 14 sekund nastal proces zhušťování.

Tenorio a Moya (2020) provedli výzkum na dřevinách olše a dvou druhích Vochysie, s cílem otestování vlastností dřeva zhuštěného při 12 různých úpravách, mezi kterými byla i metoda s přiváděnou párou. Byly zde použity teploty 140 °C, 160 °C a 180 °C, kompresní doba byla 10 a 15 minut. Celý proces zhušťování se skládal ze 3 fází. V první fázi došlo k plastifikaci vzorků napařováním nebo zahříváním, na první polovinu vzorků působila 10 minut pára, zatímco druhá polovina vzorků byla pouze tepelně zpracována. Ve druhé fázi proběhla komprese po stanovenou kompresní dobu až do dosažení cílové tloušťky. Třetí fáze byla stabilizační, vzorky zůstaly stlačené a zahřáté po dobu 10 minut. Po dobu celého procesu si kovové desky udržovaly jednu ze zmíněných tří teplot. Kompresní poměr u všech tří dřevin po zhutnění byl podobný a pohyboval se okolo 55 %. Vzorky olše, které byly zpočátku plastifikovány párou a následně došlo k 10minutové kompresy při teplotě 160 °C dosáhli zpětné odpružení 7,97 %, oproti tomu stejné vzorky, u kterých nebyla provedena plastifikace pomocí páry dosáhli zpětné odpružení 8,38 %. Podobně tomu bylo i u dřeviny Vochysie. Tvrdost se zvýšila více než dvojnásobě oproti původnímu nezhuštěnému stavu, a při 10minutové kompresy a teplotě 160 °C vykazovali vzorky plastifikované párou lehce zvýšené hodnoty. Také došlo ke zvýšení modulu pružnosti ve statickém ohybu. I přes rozdílné

teploty, rozdílnou plastifikaci a odlišnou dobu komprese byly hodnoty modulu pružnosti ve statickém ohybu velmi podobné. U olše se statický modul pružnosti pohyboval okolo 13 GPa, v nezhuštěném stavu byl pouze 7,94 GPa.

1.3.4. Vysokotlaké zhušťování dřeva

Jedná se o proces bez použití tepla, při kterém je dřevěný vzorek uzavřen ve vakuovém polymerovém sáčku. Tento sáček se vzorkem je dále vložen do vysokotlaké komory, která je naplněna čistou vodou. Zhutnění dřevěného vzorku probíhá pomocí velmi vysokého izostatického tlaku, který je vytvářen vodou, tento tlak se může pohybovat v rozmezí od 50 do 200 MPa. Všechny operace probíhají za normální pokojové teploty. Doba procesu činí pouze 5 minut, v některých případech pouze 30 sekund. Zhuštěný vzorek je nepravidelného tvaru, protože se při této metodě stlačuje ta část, která má nízkou pevnost (Luan a kol. 2022).

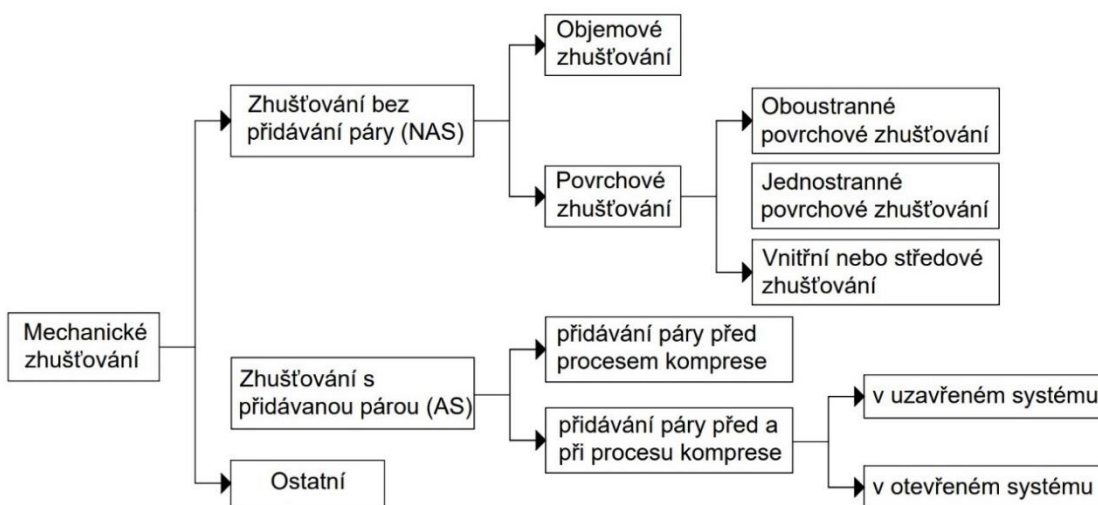
1.3.5. Zhušťování s plastifikací pomocí mikrovln

Oproti ostatním metodám, má mikrovlnná plastifikace mnoho výhod, jedná se především o vysokou energetickou účinnost nebo poměrně krátkou dobu ohřevu. Předtím než dojde k samotné plastifikaci jsou dřevěné vzorky ponořeny v destilované vodě. Následně jsou vzorky položeny na dopravní pás a prostupují skrz upravenou komoru za současného působení mikrovlnného záření. Dále navazuje operace zhuštění, která je prováděna termomechanickým způsobem. Plastifikace dřeva pomocí mikrovlnného záření by mohla mít dobrou efektivitu a je vhodná především na dřevěné podlahy. (Luan a kol. 2022).

1.3.6. Zhušťování s použitím chemie

Wang a kol. (2023) vydali vědecký článek, ve kterém zkoumali delignifikaci dřeva v návaznosti na proces zhuštění. Zhuštěné dřevo vykazuje po alkalické delignifikaci výborné mechanické vlastnosti, a to z důvodu zlepšení vodíkové vazby. V experimentu byl nejprve připraven roztok NaOH ve dvou koncentracích 0,2 % a 6 %. Alkalická delignifikace dřeva probíhala v bombovém reaktoru při teplotě 155 °C po dobu 30 minut. Poměr mezi roztokem louhu NaOH a vzorkem dřeva byl 3:1. Po

dokončení delignifikace byly dřevěné kusy omyty vodou, aby došlo k odstranění chemikálií. Po omytí byly dřevěné vzorky zhuštěny ve směru radiálním za použití tlaku 1,0 MPa po dobu 15 minut a při teplotě 150 °C. Kompresní poměry se pohybovali v rozmezí od 20 do 25 %. Dále byly vzorky dva týdny sušeny v klimatické komoře při teplotě 20 °C a 65 % relativní vlhkosti. Bylo zjištěno že se zvětšující se koncentrací hydroxidu sodného v důsledku alkalického ošetření došlo k odstraňování hemicelulóz i ligninu. Díky odstraňování ligninu se může zlepšit tuhost a mohou se snížit sorpční vlastnosti. Dřevěné prvky takto modifikované mohou mít větší životnost, která se uplatní zejména na konstrukční účely.



Obrázek č. 2 Rozdělení procesu mechanického zhušťování dřeva (Luan a kol. 2022)

Mezi další způsoby zhušťování se řadí také metoda s použitím ultrazvuku. S ultrazvukem se mimo jiné můžeme v dřevařském průmyslu setkat také při sušení, hledání vad nebo odkornění (Rudak a kol. 2021).

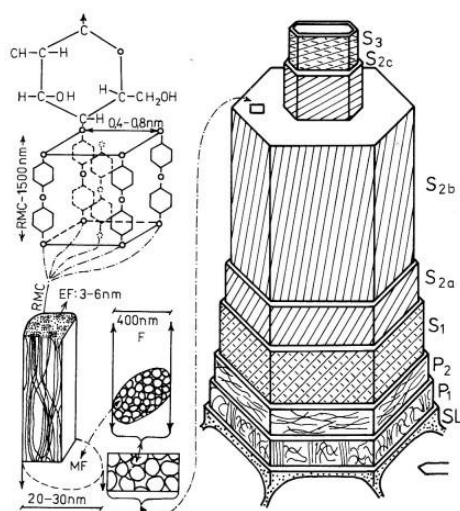
O zhušťování dřeva a jeho výhodách se ví již více než 100 let. Produkty takto vzniklé se ovšem vyrábí v poměrně malých ročních objemech a s vysokou cenou, důvodem jsou časově zdlouhavé dávkovací procesy ve vyhřívaném lisu. Tento problém lze zmírnit kontinuální metodou zhušťování, která je prováděna na válcovém lisovacím zařízení. Rychlost se může pohybovat až 20 metrů za minutu, ale nevýhodou je krátká doba kontaktu mezi povrchem dřeva a vyhřívaným válcem. Díky tomu nám vzniká velké odpružení a také může dojít k poškození dřevních buněk. Řešením by mohl být pásový lis, podobný lisům na výrobu MDF desek. Tento lis by tak zajistil nepřetržitý kontakt mezi dřevěným prvkem a pásem lisu (Scharf a kol. 2023).

1.4. Zhušťování dřeva ve vztahu ke struktuře dřeva

1.4.1. Struktura dřeva

Dřevo je složeno z 90 až 97 % hlavními složkami, které se ještě dále rozdělují na část sacharidickou kam řadíme celulózu a hemicelulózy a na část aromatickou kam by se zařadil lignin. Dále má dřevo také látky extraktivní, mezi které patří například alkoholy, terpeny, fenoly nebo bílkoviny (Požgaj a kol. 1993). Hlavní složkou dřeva je celulóza, která se skládá z glukózových jednotek a její řetězec probíhá přes krystalické a amorfní oblasti, přičemž uspořádaná krystalická celulóza tvoří základní kostru dřeva. Lignin je brán jako spojovací prostředek mezi celulózou a hemicelulózami, který dodává dřevu mechanickou pevnost (Požgaj a kol. 1993, Sikora 2021, Bejšák 2022).

Takto je tvořena základní anatomická struktura dřeva. Dlouhé celulózové řetězce se seskupují do elementárních fibril neboli micel. Tyto micely v počtu okolo 20 až 60 dále tvoří mikrofibrilu, a přibližně 20 mikrofibril tvoří makrofibrilu která pak následně vytváří úzké vrstvy neboli lamely ze kterých se formuje buněčná stěna. Buněčná stěna se skládá ze střední lamely a primární a sekundární stěny. Střední lamela je tvořena přibližně ze 70 % ligninem a má především funkci spojovací. Sekundární stěna, která je složena z podvrstev S1, S2 a S3, představuje značnou část buněčné stěny. Střední část sekundární stěny S2 má zcela největší zastoupení v celé sekundární stěně a to okolo 88 %, z tohoto důvodu je tato vrstva nejdůležitější. V této vrstvě S2 je velmi důležitý odklon fibril, který může mít veliký vliv na pevnost dřeva (Požgaj a kol. 1993, Sikora 2021, Bejšák 2022).



Obrázek č. 3 Schéma buněčné stěny. RCM – řetězce makromolekul celulózy, MF – mikrofibrila, EF – elementární fibrila, F – makrofibrila, SL – střední lamela, P1, P2 vrstvy primární buňkové stěny, S1, S2, S3 vrstvy sekundární buňkové stěny (Požgaj a kol. 1993).

Na mikroskopické úrovni lze pozorovat pletiva a samostatné buněčné elementy. Složená pletiva se skládají z velkého počtu stejných buněk a jako jeden celek vykonávají určité úkony, mají například funkci vodivou, krycí nebo zásobní. Listnaté dřeviny jsou vývojově mladší než dřeviny jehličnaté a mají složitější stavbu, uzpůsobenou svému účelu. Cévy neboli tracheje jsou elementy, které slouží na vedení vody a najdeme je pouze u dřevin listnatých. Pro zpevňující mechanickou funkci mají listnaté dřeviny libriformní vlákna, jejichž podíl závisí na druhu dřeviny (Požgaj a kol. 1993, Sikora 2021, Bejšák 2022).

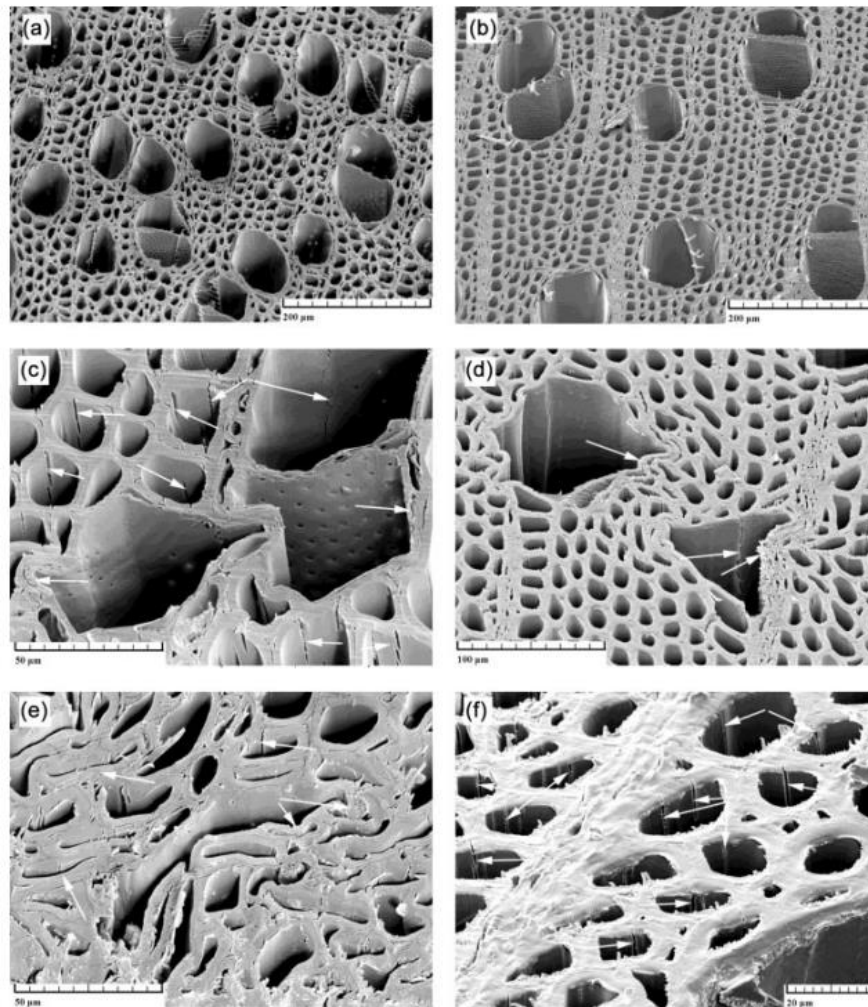
Na úrovni makroskopické je možné pozorovat většinu znaků pouhým zrakem nebo lupou a díky textuře dřeva lze rozpoznat konkrétní dřevinu. Letokruhy, jarní a letní dřevo, jádro, běl, dřeňové paprsky, pryskyřičné kanálky, dřeňové skvrny a suky jsou základními makroskopickými znaky dřeva (Gandelová a kol. 2002).

1.4.2. Struktura dřeva v návaznosti na proces zhušťování

Metody zhušťování dřeva používané pro dosažení stabilního produktu nám mění jeho anatomickou strukturu. Proces viskoelastické tepelné komprese vyvolává ve dřevě vysoké napětí, díky kterému dochází k deformaci lumenu. Tím také dojde ke zmenšení objemu lumenu. Buňky se ovšem deformují takovým způsobem, při kterém nedojde k deformaci buněčných stěn (Kutnar a kol. 2008). Při mechanickém zhušťování tedy dochází ke změně mikrostruktury a také ke zmenšení objemu dutin dřeva (Luan a kol. 2022).

Bekhta a jeho kolegové (2017) se zabývali krátkodobým termomechanickým procesem zhušťování dřeva při kterém pozorovali také anatomickou strukturu. V této studii byly použity dřevěné dýhy buku lesního, olše, břízy a borovice lesní. Počáteční vlhkost dýh před počátek zhutňovacího procesu činila 5 %. Po dokončení procesu zhuštění a následném ochlazení vzorků na pokojovou teplotu byla provedena analýza

skenovací technikou pracující na principu elektronové mikroskopie, a byla vyhodnocena mikrostruktura zhuštěných a nezhuštěných dých.



Obrázek č. 4 Mikrosnímky zhuštěných a nezhuštěných dých. a) Nezhuštěná dýha z olše, b) Nezhuštěná dýha z břízy, c) Zhuštěná dýha z olše při teplotě 150 °C a tlaku 8 MPa, d) Zhuštěná dýha z břízy při teplotě 150 °C a tlaku 8 MPa, e) Zhuštěná dýha z olše při teplotě 200 °C a tlaku 12MPa, f) Zhuštěná dýha z břízy při teplotě 200 °C a tlaku 12 MPa (Bekhta a kol. 2017)

Morfologie dřevěné dýhy silně závisí na kompresním poměru. Čím více se při zhušťování zvyšoval tlak, tím více se také zvyšovala deformace v cévách, až se zhrotily, to lze vidět na obrázku (4e, 4f). V buněčných stěnách libriformních vláken vzniklo mnoho trhlin, které jsou znázorněny šipkami na obrázku č.4. V této mikroskopické studii bylo zjištěno, že struktura zhuštěné dýhy byla poškozena více než struktura u masivního dřeva. Byl zaznamenán veliký počet trhlin v buněčných stěnách u dých, které byly zhuštěny pod vysokým tlakem a teplotou. To mohlo být zapříčiněno nízkou počáteční vlhkostí dýhy, která nebyla nijak vlhčená, a proto vykazovala větší křehkost. Masivní dřevo má také větší pevnost než dýha, navíc dýha musela projít procesem

loupáním a sušením při kterém mohlo dojít ke vzniku trhlin, které dýhu následně oslabují. Ve výsledcích v návaznosti na velikost cév zhuštěných dých se potvrdila skutečnost, že hustota dřeva vzrostla díky zmenšení objemu dutiny. Průměry lumenů u dřevěných slisovaných dých byly o mnoho menší než u dřeva nezhuštěného. Při použitém maximálním tlaku se u dých z olše zmenšila velikost trachejí o 65,9 %. A velikost cév u březových dých se snížila 3,55krát, tedy o 71,8 %. Byla zde prokázána negativní korelace mezi velikostí cév a kompresním poměrem (Bekhta a kol. 2017).

1.5. Důležité jevy v návaznosti na proces zhušťování

1.5.1. Náhlé zpětné odpružení

Náhlé nebo okamžité odpružení nastává při procesu zhutňování ihned po odstranění tlakových sil působících na dřevěný prvek. Tomuto jevu se také říká „Spring-back“ a vzniká v důsledku uvolnění elastických napětí v chemických vazbách při působení vnějších sil. Rozsah tohoto efektu je závislý na teplotě a vlhkosti dřevěného vzorku. Plastifikace dřeva má na zpětné odpružení vliv, obecně dřevo, které bylo plastifikováno bude vykazovat větší hodnoty zpětného odpružení. S tímto efektem se setkáme v podstatě vždy, nelze ho zcela vyloučit (Neyses 2016, Bejšák 2022).

1.5.2. Odpružení zpětné v čase

Tomuto jevu se říká také „Set-recovery“ neboli odpružení které nastává až po určité době po procesu zhušťování. Tento efekt nastává u zhuštěného dřeva po ochlazení a vysušení a následné opětovné plastifikaci například vlhkostí. U dřeva, které není zafixováno pomocí vnějších sil dochází k obnově elastické deformace u krystalické celulózy a díky tomu má dřevo tendenci navrátit se do svých původních rozměrů. V praxi se takto modifikované dřevo může navrátit až o 70-90 %. K úplnému zotavení nedochází buďto z důvodu poškození dřevních buněk vlivem procesu zhušťování nebo vlivem plastifikace při které došlo k uvolnění napětí. Proces zhušťování se může stát zbytečným, pokud dojde k zotavení buněk dřeva a dojde k téměř úplnému navrácení rozměrů. Aby se tomto jevu zabránilo bylo vyvinuto několik možným řešeních. V počátcích zhušťování dřeva se eliminace zpětného odpružení v čase prováděla pomocí impregnace například fenolformaldehydovou pryskyřicí. Díky impregnaci bylo dřevo měkčí, a tedy mělo dobrou plastifikaci před proces zhutnění a zároveň si

zachovalo po zhuštění mechanickou stabilizaci a nedocházelo k tak velkému „Set-recovery“. Další metodou bylo napařování dřeva párou, které probíhalo do té doby, dokud nedošlo k plastifikaci všech buněk dřeva. Napařování probíhalo z počátku odděleně od procesu zhušťování v autoklávu nebo v reaktoru. Později byl vyvinut uzavřený systém zhušťování, který kombinoval zhušťovací proces a napařování. Plastifikace párou nám výrazně snížila zpětné odpružení, které se mohlo pohybovat pouze okolo 10 %. Byl také vyvinut způsob, při kterém docházelo k vyplňování lumenů buněk nějakým druhem impregnačního činidla například furfurylalkoholem. Tato metoda probíhala vakuově tlakovým procesem po dobu 45 minut a došlo k dalšímu výraznému snížení zpětného odpružení v čase (Neyses 2016, Bejšák 2022).

1.5.3. Relaxace napětí

Tento jev se podílí na zpětném odpružení v čase. Zatížení, které je potřebné k udržení konstantní deformace se s časem snižuje, tomuto jevu se říká relaxace napětí. Deformační mechanismy, které se podílejí na relaxaci napětí jsou podobné jako u tečení dřeva. Teplo, vlhkost a pára mohou urychlovat relaxaci napětí. Dřevo po odebrání z lisu pruží, pokud nebylo nějakým způsobem odstraněno vnitřní pnutí. Tento jev může být užitečný pro kvantifikaci procesu lisování masivního dřeva za tepla (Morsing 1988).

1.6. Průmyslové využití zhušťovaného dřeva

Zhuštěné výrobky jsou sice komerčně dostupné, ale jedná se o velmi specializované produkty. Vypadá to, že by se tyto výrobky pro svoje velmi dobré mechanické vlastnosti mohli v blízké době na trhu rozšířit. Při bližším pohledu na věc zjistíme že je zde velká mezera mezi publikovanými studii a průmyslovou velkovýrobou. Tato mezera je způsobena hlavně nízkou efektivitou dávkovacích lisů. Termomechanické zhušťování může trvat i několik hodin a hydrotermomechanické zhušťování v uzavřeném systému je zase vysoce energeticky náročné. Většina studií byla zaměřena na zhušťování dřeva bez vad, tedy bez suků, prasklin a odchylek od hustoty. Nastává proto otázka, zda může být řezivo rovnou po zpracování na pile zhuštěno, aniž by nedošlo k zdlouhavému a nákladnému odstraňování vad (Neyses 2016).

Už ve 20. století ve 30. letech se zhuštěné dřevo používalo a nahrazovalo kovové materiály. Používalo se zejména pro vojenské aplikace, z důvodu zabránění detekci radarů, které by jinak zachytily kovové předměty (Luan a kol. 2022). Díky zvýšené tvrdosti zhuštěného dřeva dojde také ke zlepšení odolnosti proti otěru, která je důležitá zejména pro parkety, podlahy, pracovní desky nebo běžné povrchy nábytku. U měkkých dřevin se může rozšířit jejich spektrum použití, mohou se uplatnit například ve stavebnictví u oken a dveří. Zhuštěné dřevo také začalo nahrazovat kluzná ložiska která byla normálně vyrobena z drahých slitin či polymerů (Rudak a kol. 2021). Zhuštěné dřevo by mohlo být dokonce pevnější než ocel a využívat by se mohlo i v automobilovém průmyslu a také k výrobě neprůstřelných pancéřových plátů (www.scientificamerican.com 2018). Další využití tento produkt nachází v tepelném a elektrotechnickém průmyslu kde se využívá jako kvalitní izolační materiál. Zhuštěné dřevo ve formě tuhých desek se zde používá hlavně na podpěry pro přípojnice, kabely, spínače a jističe (www.insulcut.com.au 2024).



**Obrázek č. 5 Zhuštěné dřevo (Permali) používané v elektrotechnice jako izolační materiál
(www.insulcut.com.au 2024)**

Tyto tuhé desky, které lze vidět na obr. č. 5. jsou vyrobeny z bukových dýh naimpregnovaných syntetickými pryskyřicemi zhuštěnými za extrémně vysokého tlaku a teploty. Dýhy jsou navíc stlačovány střídavě pod úhlem 90° a díky tomu mají desky daleko větší pevnost a stabilitu. Desky mají standartní velikost 2000 x 1000 mm a tloušťky od 6 do 120 mm (www.insulcut.com.au 2024).

2. Fyzikální vlastnosti ve vztahu ke zhušťování dřeva

2.1. Hustota dřeva

Hustota dřeva má veliký vliv na vlastnosti fyzikální a mechanické. Podle hustoty se také odvíjí vhodnost použití dané dřeviny, ve stavebnictví je například vyžadována vysoká pevnost nebo pružnost při současné nízké hmotnosti. Důležitou roli zde hraje také vlhkost, která hustotu přímo ovlivňuje. Vlastnost označována jako hustota se vypočítá jako poměr mezi hmotností a objemem dřeva při určité vlhkosti, přičemž vlhkost je stejná u hmotnosti i u objemu (Požgaj a kol. 1993, Bejšák 2022). V tomto případě pak hovoříme o hustotě dřeva vlhkého, která je dána následujícím vztahem:

$$\rho_w = \frac{m_w}{V_w} \quad [\text{kg} * \text{m}^{-3}] \quad (1)$$

Kde,

m_w – hmotnost dřeva při dané vlhkosti [kg]

V_w – objem dřeva při dané vlhkosti [m³]

ρ_w – hustota dřeva při dané vlhkosti [kg * m⁻³]

V literatuře se běžně vyskytuje také hustota dřeva při 12 % vlhkosti, která je dosažena při delším vystavení dřeva v běžných podmínkách, přesněji při teplotě 20 °C a relativní vlhkosti vzduchu 65 %. Také se lze setkat s hustotou dřeva v suchém stavu, tedy při vlhkosti 0 % (Horáček 1998, Bejšák 2022).

Dřeviny lze podle hustoty dřeva při 12 % vlhkosti rozdělit do těchto následujících skupin. Do 540 kg.m⁻³ se jedná o dřeviny s nízkou hustotou, do této skupiny se řadí například smrk, jedle, topol nebo vrba. Další skupina představuje dřeviny s hustotou střední, kam spadá například modřín, bříza, dub, jasan nebo buk, zde se hustota pohybuje od 540 do 750 kg.m⁻³. Mezi dřeviny s vysokou hustotou převyšující 750 kg.m⁻³ se řadí habr, dřín, moruše a akát. Toto rozdělení platí pro dřeviny, které se vyskytují na území České republiky. (Horáček 1998).

2.2. Vlhkost dřeva

Dřevo je schopné absorbovat ze vzduchu vodní páry a zadržovat je ve formě vody, této vlastnosti se říká hygroskopicitata (homel.vsb.cz, Bejšák 2022). Vlhkost je pak množství kapalin (vody) ve dřevě. Na mechanicko-fyzikální vlastnosti má vlhkost významný vliv (Požgaj a kol. 1993, Bejšák 2022). Absolutní vlhkost je vyjádřena poměrem mezi hmotností vody a hmotností dřeva v absolutně suchém stavu. Relativní vlhkost je pak vyjádřena jako podíl hmotnosti vody k hmotnosti dřeva mokrého (Horáček 1998). Absolutní a relativní vlhkost lze vyjádřit pomocí následujících vzorců (Požgaj a kol. 1993).

$$w_a = \frac{m_v}{m_0} * 100 = \frac{m_w - m_0}{m_0} * 100 [\%] \quad (2)$$

$$w_r = \frac{m_v}{m_w} * 100 = \frac{m_w - m_0}{m_w} * 100 [\%] \quad (3)$$

Kde,

w_a – absolutní vlhkost [%]

w_r – relativní vlhkost [%]

m_0 – hmotnost dřeva absolutně suchého [kg]

m_w – hmotnost dřeva vlhkého [kg]

Při procesu zhušťování může vysoká vlhkost dřevo změkčit, ale také dochází k tvorbě vnitřního tlaku vodní páry, který může způsobit explozi. Ve většině studiích byla často používána vlhkost vzorků 12 % a více (Bekhta 2017). Čím má dřevo při plastifikaci větší vlhkost tím se snižuje teplota, která je potřebná pro dosažení skelného přechodu. Skelný přechod představuje důležitou hranici, nad kterou se dřevo stává snadno deformovatelné, aniž by přitom docházelo k porušení buněčných stěn (Neyses 2016, Bejšák 2022).

2.3. Drsnost povrchu

Soubor nerovnoměrností, nebo povrchových výškových rozdílů nám definuje drsnost povrchu. Tyto nepravidelnosti nebo takzvané odchylky tvaru vznikají při výrobě pohybem řezného nástroje. Mezi hlavní faktory, které nám ovlivňují kvalitu povrchu lze zařadit řezné podmínky při obrábění. Zde se jedná především o řeznou rychlost a velikost úběru materiálu. Dále nám drsnost ovlivňuje také druh nástroje a jeho geometrie a způsob obrábění (www.accretech.eu 2019).

Dodnes neexistuje žádné standardizované doporučení pro hodnocení kvality obrobených dřevěných povrchů ani také není žádná platná shoda ohledně definice drsnosti povrchu dřeva nebo způsobu jejího měření. Ve srovnání s ostatními homogenními materiály je definice povrchu u dřeva obtížná. Každý druh dřeva má rozdílnou anatomii, a navíc je dřevo také materiál porézní. Stávající normy pro měření a vyhodnocování počítají pouze s drsností způsobenou procesem obrábění, z tohoto důvodu nejsou tyto normy použitelné ve všech případech. Při kontaktu mezi řezným nástrojem a dřevem zůstávají na povrchu dřeva nepravidelnosti. Velikost těchto nepravidelností představuje kvalitu zpracování. Drsností lze tedy charakterizovat kvalitu zpracovaného povrchu. U měření drsnosti je důležité brát ohledat na správné nastavení přístroje, rozlišení, délky měření a filtrů (Gurau a Irlé 2017).

Drsnost povrchu má dopad na opotřebování nástrojů. Dále na drsnosti závisí také pevnost spoje při lepení. V případě hrubé dýhy namísto hladké může dojít ke snížení pevnosti až o třetinu. Hladkost povrchu má rovněž vliv i na povrchové úpravy, povrch s minimální drsností bude mít poměrně malou spotřebu nátěrové hmoty. Nízká drsnost nemusí být vždy vyžadována, v některých případech je hrubší povrch vyhledávaný (Sandak a Negri 2005, Bejšák 2022).

2.4. Vlnitost profilu

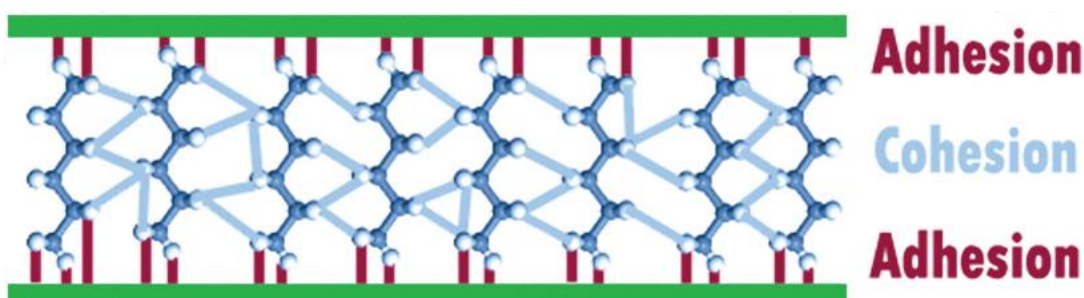
Vlnitost lze chápat jako soubor periodicky se opakujících nepravidelností na povrchu. Většinou je zvlnění charakterizováno těmito dvěma parametry: výškou zvlnění povrchu WZ a roztečí zvlnění povrchu SW. U zkoumaných vzorků je stanovování zvlnění důležité hlavně pro posuzování kvality (Федорова a Васильев 2021).

2.5. Smáčivost povrchu

Smáčivost povrchu můžeme také definovat jako schopnost kapaliny přilnout k pevnému povrchu. Smáčivost podle druhu aplikace může nebo nemusí být vyžadována. Smáčivost je určována adhezními a kohezními silami mezi pevnou látkou a kapalinou (www.biolinscientific.com 2019).

Koheze: Soudržnost neboli koheze je vlastně vzájemná přitažlivost molekul stejné látky. Síly v kohezi působí mezi stejnými typy molekul. Soudržným silám se také říká vodíkové vazby, tyto vazby mají tendenci přitahovat molekuly k sobě (www.biolinscientific.com 2019).

Adheze: Přilnavost neboli adheze je vlastně vzájemná přitažlivost mezi odlišnými molekulami. Silám v adhezi se také říká van der Waalsovy síly (www.biolinscientific.com 2019).



Obrázek č. 6 Porovnání adheze a koheze v lepeném spoji (Zotti a kol. 2016)

Rovnováha mezi silami adheze a koheze definuje úroveň smáčivosti. Dále záleží také na povaze pevných látek, které lze rozdělit na vysokoenergetické a nízkoenergetické. Vysokoenergetické látky jsou drženy pohromadě díky chemickým vazbám, které jsou zpravidla velice silné, díky tomu dochází k přebytku energie na povrchu těchto pevných látek. Mezi tyto látky se řadí například kovy, sklo nebo keramika. Mezi pevné látky nízkoenergetické spadá například teflon a další polymery (www.biolinscientific.com 2019).

Povrch dřeva, který byl výrazně modifikován může ovlivnit smáčivost a přilnavost při procesu lepení a natírání. Smáčivost mezi pevným substrátem a kapalinou lze určit pomocí měření kontaktního úhlu. Dřevo jakožto materiál s určitou drsností, hygroskopicitou a chemicky nepravidelnou strukturou je ze své podstaty obtížné změřit z hlediska smáčivosti povrchu. Kapalína má tendenci šířit se a pronikat do porézního

dřeva. Kontaktní úhel se tak neustále mění v závislosti na čase vlivem pohybu kapaliny (Kutnar a kol. 2008).

2.5.1. Youngův model smáčivosti

V roce 1805 navrhl Thomas Young rovnici, která je zařazována mezi základní teorii smáčivosti. Kontaktní úhel pomocí Youngovi rovnice lze určit následující rovnicí (Peethan a kol. 2023).

$$\cos \theta = \frac{\gamma_{sv} - \gamma_{sl}}{\gamma_{lv}} \quad (5)$$

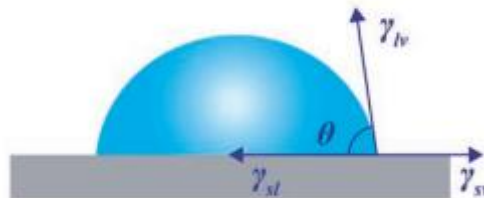
θ – úhel smáčení [°]

γ_{sv} – mezifázové napětí (pevná látka-pára)

γ_{sl} – mezifázové napětí (pevná látka-kapalina)

γ_{lv} – mezifázové napětí (kapalina-pára)

Tento vztah platí pro kapku, která byla nanesena na ideální povrch. Ideálním povrchem se myslí povrch izotropní, chemicky homogenní, nereaktivní a atomárně plochý (Peethan a kol. 2023)



Obrázek č. 7 Schematické znázornění Youngova modelu smáčení. θ – úhel smáčení, γ_{sv} – mezifázové napětí pevné látky a páry, γ_{sl} – mezifázové napětí pevné látky a kapaliny, γ_{lv} – mezifázové napětí kapaliny a páry (Peethan a kol. 2023)

Pomocí experimentálně naměřených hodnot rovnovážného kontaktního úhlu s vodou lze určit, zda je povrch hydrofilní nebo hydrofobní, případně superhydrofobní. Povrch, který má kontaktní úhel menší než 90° je často označován jako hydrofilní, naproti tomu povrch, který má kontaktní úhel větší než 90° ale menší než 150° je brán jako hydrofobní. Povrch, který převyšuje kontaktní úhel 150° se nazývá superhydrofobní. Úplná smáčivost nastává u materiálů s velmi vysokou povrchovou energií, přičemž kontaktní úhel se zde pohybuje okolo 0° (Peethan a kol. 2023).

2.5.2. Měření smáčivosti pomocí kontaktního úhlu

Na stanovení kontaktního úhlu bylo vyvinuto mnoho různých technik. Mezi jednu z používaných metoda je metoda přisedlé kapky. Tato metoda je založená na analýze tvaru kapky, která je spuštěna na zkušební povrch, kde se následně vyhodnocuje kontaktní úhel montážním postupem. Zařízení na tuto metodu má také zobrazovací systém s vhodným osvětlením, motorizovaný dávkovací systém a stolek pro vzorky. Kapka je nadávkována a na testovací povrch umístěný vodorovně je opatrně nanesena. Při doteku kapky a následné stabilizaci dojde k pořízení snímku obrazovky. Výsledná smáčivost se odvíjí od pořízeného snímku, a proto je potřeba získat dostatečně ostrý a osvětlený obraz. V této metodě přisedlé kapky lze použít způsob tangenciální metody která vyhodnocuje tečný úhel v kontaktním bodě, nebo lze použít metody kruhové a eliptické. Důležitým pojmem je také tzv. hystereze kontaktního úhlu, která je definována jako rozdíl mezi postupujícími a ustupujícími kontaktními úhly, jedná se vlastně o stykové úhly maximální a minimální při současném zvětšování a zmenšování objemu kapky. (Peethan a kol. 2023).

Další metodou, kterou lze měřit smáčivost je metoda naklápěcí desky. Tato metoda je poměrně jednoduchá a je používána k posouzení hystereze kontaktního úhlu. Při této metodě je použito stejné zařízení jako v metodě přisedlé kapky, rozdíl je v pouze u pracovní desky se vzorkem, kterou je možné naklápět. Na vodorovnou zkušební plochu je umístěna přisedlá kapka, deska se následně začne naklápět a je změřen úhel posuvu, který je definován jako úhel sklonu, při kterém se kapka začne pohybovat. Čím je úhel větší tím více se kapka deformuje. Tato metoda je sice poměrně jednoduchá, ale má také svá omezení, zejména u ploch s velkou hysterezí, proto se spíše upřednostňují jiné metody (Peethan a kol. 2023).

Metoda zajetí bublin, je méně rozšířená metoda, při které je zkušební vzorek ponořen do nádoby naplněné kapalinou. V této nádobě je vzorek udržen na horní straně a následně je vstříknuta bublina která se zachytí na zkušebním vzorku. Tak jako u metody přisedlých kapek se zaznamená kontaktní úhel a provede se profilová analýza (Peethan a kol. 2023).

3. Tvrdost dřeva

Tvrdost je schopnost materiálu odolávat působícímu nástroji, který má tendenci proniknout do jeho struktury. Odolnost dřeva proti průniku závisí na tvaru nástroje, způsobu průniku a na anatomickém směru dřevních vláken. Podle délky zatížení existuje rozdělení na statické a dynamické metody tvrdosti. Výzkum tvrdosti dřeva se provádí již přibližně 160 let. Korelace mezi hustotou a tvrdostí byla poprvé zaznamenána na počátku 18. století (Vörös a Németh 2020, Bejšák 2022). Tvrdost je také zásadní při obrábění dřeva reznými nástroji nebo v případech kdy se dřevo odírá (Gandelová a kol. 2002).

Postupem času byla vyvíjena celá řada metod na vyhodnocování tvrdosti. Brinell přišel se svou metodou v roce 1900. Tato metoda byla vyvinuta pro měření tvrdosti kovů, avšak našla své využití i v odvětví zpracování dřeva. V roce 1906 byla publikována první studie tvrdosti metodou dle Janka, ve které byly zkoumány rakouské dřevěné stavební materiály. Janka použil na měření tvrdosti zpočátku ocelovou kostku, která byla následně změněna na kuličku o průměru 11,284 mm. Dále například Kumichel a Holz v roce 1955 použili na měření tvrdosti těleso kuželové, protože se domnívali že hodnota tvrdosti bude takto nezávislá na aplikované síle. Takto postupně vzniklo 5 hlavních metod měření tvrdosti, které se od sebe odlišují zejména rozdílným tvarem vtlačovaného prvku (Vörös a Németh 2020, Bejšák 2022). Mezi dvě nejpoužívanější metody se řadí metoda podle Brinella a metoda dle Janka. Byly porovnány různé metody tvrdosti pro různé dřeviny a došlo se k závěru, že nejspolehlivější výsledky byly získány testem tvrdosti podlahových materiálu metodou podle Brinella (Sydor 2020).

Obecně dřevo s větší hustotou má zlepšené mechanické vlastnosti a je tedy zvýšena i celková jeho kvalita. Hustota dřeva je v silné korelaci mezi tvrdostí a pevností. U zhušťovaného dřeva lze tedy očekávat zvýšení tvrdosti (Rudak a kol. 2021).

3.1. Měření tvrdosti dřeva dle Brinella

Při použití této metody je do dřevěného vzorku vtlačována ocelová nebo karbidová kulička, průměr této kuličky je 10 mm. Kulička se následně vyjme a pomocí mikroskopu se zaznamená trvalý průměr vtisku. Největší vtisk kuličky je ovšem dosažený v průběhu měření, kdy je vzorek vystaven síle. Při odebrání síly, totiž dochází

k částečnému elastickému zotavení, vtisknutí má pak tendenci se zmenšit. Měření hloubky vtisku během zatížení namísto vizuálního měření poskytuje hodnoty, které lépe korelují s hustotou. Brinellova metoda tedy zaznamenává hloubku vtisku během zatížení a z hloubky vtisku se následně vypočítá tvrdost. Tato varianta měření je velice vhodná zvláště u měření pružného dřeva nebo u podlahových materiálů, je zde přihlíženo na elastickou a plastickou deformaci a je brán větší ohled na vlastnosti dřeva. U dřevin velmi tvrdých se používá vlačovací síla 1000 N. U dřeva středně tvrdého se pak volí zatížení 500 N a u velmi měkkých dřevin je bráno zatížení 100 N (Sydor 2020, Požgaj a kol. 1993). Tvrdost podle Brinella můžeme vyjádřit následujícím vzorcem. Počítá se vlastně jako podíl působící síly a plochy (Požgaj a kol. 1993).

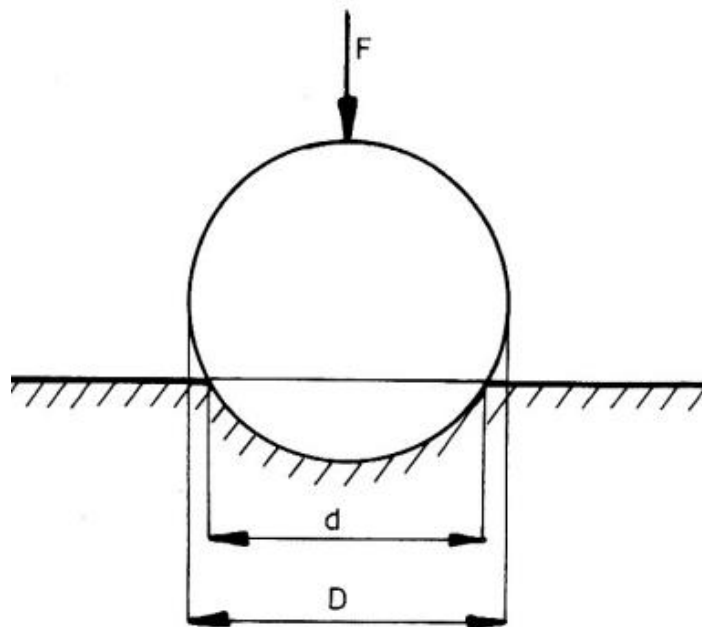
$$H_B = \frac{2*F}{\pi*D*(D-\sqrt{D^2-d^2})} [MPa] \quad (4)$$

H_B – Brinellova tvrdost [MPa]

F – Síla působící na kuličku [N]

D – průměr kuličky [mm]

d – průměr vtisku na ploše dřeva [mm]



Obrázek č. 8 Schématické znázornění měření tvrdosti podle Brinella. F – síla která působí na kuličku, D – průměr kuličky, d – průměr otisku (Požgaj a kol. 1993)

3.2. Měření tvrdosti dřeva dle Janka

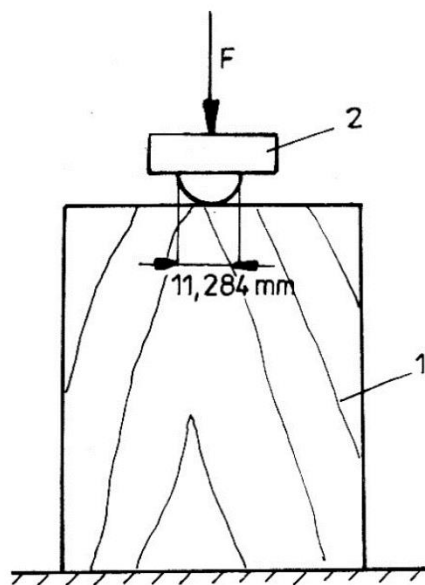
V roce 1906 publikoval G. Janka první studie o tvrdosti, které probíhali ve spolupráci s A. Hádkem. Janka nejprve vlačoval do materiálu s hladkým povrchem ocelovou kostku s průřezem 10 cm². Následně v roce 1906 přešel na další metodu která je velmi podobná Brinellově metodě (Vörös a Németh 2020). Při měření Jankovi tvrdosti se v současnosti do dřeva vtláčuje speciální tlačidlo které je zakončené polokuličkou o průměru 11,284 mm. Tvrdost podle Janka se vypočítá podílem síly a vzniklé otačené plochy, přičemž vzniklá plocha je vždy o velikosti 100 mm² a potřebná síla je vždy tak velká, aby došlo k vtažení polokuličky do dřeva (Požgaj a kol. 1993). Tvrdost podle Janka se tedy vypočítá následovně:

$$H_J = \frac{F}{S} \quad [MPa] \quad (5)$$

H_J – Jankova tvrdost [MPa]

F – Síla potřebná na zatlačení polokuličky [N]

S – Otačená plocha [100 mm²]



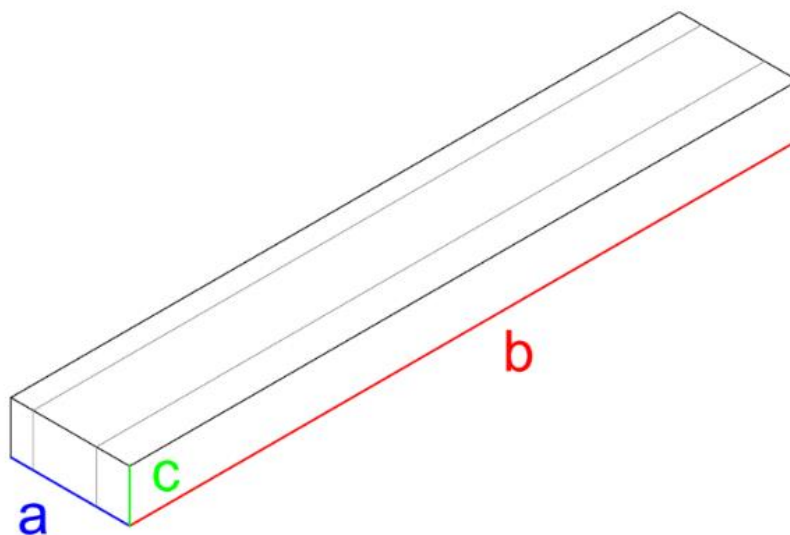
Obrázek č. 9 Schématické znázornění měření tvrdosti podle Janka. F – síla potřebná na zatlačení polokuličky, 1 – dřevo, 2 – tlačidlo s polokuličkou (Požgaj a kol. 1993)

4. Metodika

4.1. Popis vzorků

Pro tuto práci byly vzorky vyrobeny z bukového dřeva (*Fagus Sylvatica L.*). Jedná se o domácí listnatou dřevinu roztroušeně pórovitou. Bukové dřevo je poměrně tvrdé a středně těžké. Hustota této dřeviny se pohybuje okolo 712 kg.m^{-3} . Dřevinu lze snadno poznat podle narůžovělé barvy a charakteristických dřevných paprsků vřetenovitého tvaru které jsou dobře viditelné na všech řezech. Bukové dřevo má poměrně pravidelnou a homogenní stavbu. Tato dřevina nachází své uplatnění především při výrobě nábytku, parket a překližek. Z bukového dřeva se také mohou vyrábět dýhy nebo schodiště (Zeidler a Borůvka 2016).

Pro tuto práci byly z bukového dřeva zhotoveny lamely o délce 300 mm a šířce okolo 20 mm. Tloušťkový rozměr bukových lamel byl zvolen tak aby po procesu zhuštění odpovídala konečná tloušťka hodnotě 5 mm. Takto to platí pro všechny stupně zhuštění. Přibližný tvar zkušebních vzorků je možné vidět na obrázku č. 10. Jsou zde také naznačeny jednotlivé rozměry (délka, šířka a tloušťka). Radiální řez se nachází na pomyslné ploše, kterou představuje modrá a červená úsečka (a, b).



Obrázek č. 10 Rozměry zkušebních vzorků. a – šířka vzorku, c – tloušťka vzorku, b – délka vzorku (Zdroj: Autor práce)

Tloušťkové rozměry před zhuštěním se tedy mezi jednotlivými stupni odlišovali. Tyto rozměry byly stanoveny tak aby po zhuštění o danou procentuální hodnotu bylo dosaženo konečné tloušťky 5 mm. Počáteční tloušťky pro jednotlivé stupně zhuštění lze vidět v tabulce č. 1.

Tabulka č. 1 Tloušťky vzorků před a po zhuštění (Zdroj: Autor práce)

Stupeň zhuštění [%]	Počáteční tloušťka vzorku [mm]	konečná tloušťka vzorku [mm]
0	5	5
5	5,26	5
10	5,56	5
15	5,88	5
20	6,25	5

4.2. Zhušťování zkušebních vzorků

Zhuštění vzorků bylo provedeno na hydraulickém lisu TOS Rakovník. Jednalo se o objemové zhuštění termomechanickou metodou v tangenciálním směru. Spodní i vrchní deska lisu byla vyhřátá na teplotu 160 °C (± 5 °C). Dřevěné vzorky měli před tloušťkovým lisováním vlhkost 12 % (± 1 %). V tabulce číslo 2. je možné vidět jednotlivé stupně zhuštění a jejich dobu stlačení. Lisovací tlak se s rostoucími stupni zhuštění postupně mírně zvyšoval a pohyboval se přibližně okolo 30 MPa. Zmíněný hydraulický lis TOS Rakovník je možné vidět v příloze č. 21.

Tabulka č. 2 Doba zhuštění pro příslušné stupně (Zdroj: Autor práce)

Stupeň zhuštění [%]	Doba stlačení [min]
5	5
10	5,5
15	6
20	6,5

4.3. Výroba a označení zkušebních těles

Zkušební vzorky byly vyrobeny z dlouhých bukových lamel. Nejprve byly lamely v celé délce tloušťkově a šířkově obrobny za pomoci tloušťkovací frézky SCM s630 class viz příloha č. 19, dále následovalo délkové zkrácení na kotoučové pile. Od začátku byly vzorky čitelně označeny, přičemž vždy byl uveden stupeň zhuštění a číslo vzorku. První číslo na vzorcích označovalo úroveň zhuštění (5, 10, 15, 20) a číslo druhé za lomítkem označovalo číslo konkrétního vzorku v dané skupině zhuštění. Referenční skupina vzorků, kde nedošlo ke zhuštění byla před lomítkem označena nulou. Vyhotovené vzorky byly zváženy na laboratorní váze a změřeny pomocí posuvného

měřítka viz příloha č.20. Tloušťkové a šířkové rozměry vzorků byly vždy měřeny ve třech místech – na krajích a uprostřed. Délka vzorku byla změřena jedním měřením přibližně uprostřed.

Po změření a zvážení všech hodnot byly následně vypočítány aritmetické průměry šířek a tloušťek vzorků. Z délkového rozměru a průměrné hodnoty šířky a tloušťky byl pro každý vzorek vypočten objem, který se spočítal podle vzorce na objem kvádrů. Pomocí tohoto objemu a hmotnosti vzorku byla dopočtena hustota, dle vzorce (1). Vždy byly dopočteny průměrné hodnoty pro celé skupiny s daným stupněm zhuštění.



Obrázek č. 11 Zkušební vzorky rozdělené do skupin dle stupně zhuštění (Zdroj: Autor práce)

4.4. Měření drsnosti a vlnitosti

Drsnost se jeví jako vlastnost s přidanou obtíží, zvláště pak v oblasti dřevařství a může být poměrně subjektivní. Tato vlastnost může být vyhodnocena na základě lidským smyslů, ale pro objektivnější měření je nutno využít speciálních metod a zařízení. V současnosti je poměrně rozšířená metoda pracující na principu doteku. Při této metodě dochází k vzájemnému kontaktu mezi senzorem a povrchem dřeva. Pohyb senzoru je zpravidla v jedné ose a je tedy zaznamenán 2D profil dřevěného vzorku. Existují různé modifikace této metody, využívající například ližinu nebo hrot vyrobený z různých materiálů. Tato metoda má ovšem své limity. Mezi nevýhody se řadí: možné poškození povrchu, omezení pro vyhodnocování během procesu vlivem pomalého posuvu a nenulový poloměr hrotu. Alternativní metodou by mohlo být měření drsnosti pomocí laserového snímače. Ovšem obě tyto metody jsou založené na skenování 2D

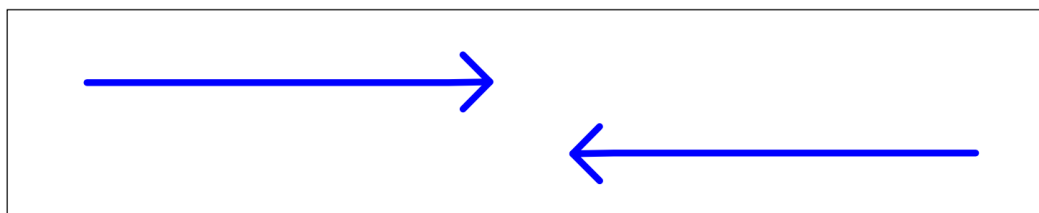
profilu. Měření v jedné ose může vykazovat rozdílné hodnoty i v rámci jednoho vzorku, to je zapříčiněno převážně anizotropním charakterem dřeva. Řešením by mohlo být skenování celé plochy, tedy 3D vyhodnocování. To by mohlo být provedeno díky navýšenému počtu senzorů. Tato metoda 3D skenování je ovšem velice komplikovaná a nákladná (Sandak a Negri 2005, Bejšák 2022).

4.4.1. Filtrování profilu

Na povrchu dřeva se tedy nacházejí různé nepravidelnosti, které lze podle rozsahu rozdělit. Mezi největší odchylku se řadí chyba tvaru. Dalšími nepravidelnostmi jsou pak vlnitost, drsnost a mikro-drsnost. Všechny tyto nepravidelnosti vznikají převážně při procesu řezání, vlivem nástroje a jeho kinematiky. Dalším nežádoucím jevem vzniklým při měření může být elektrický šum, který vzniká vibracemi sondy, stroje nebo obrobku. Aby se daným jevům a nepravidelnostem dalo předcházet je nutné je vyfiltrovat. Filtry bohužel do určité míry data zkreslují, zvláště pak u dřeva jako materiálu se složitou a nepravidelnou anatomickou strukturou. Díky filtrům dosahují naměřené parametry větší drsnosti, než tomu je ve skutečnosti. V současné době byly vyvinuty nové metody a postupy filtrů, které minimalizují jejich vliv (Sandak a Negri 2005, Bejšák 2022).

4.4.2. Měření zkušebních vzorků

Měření drsnosti a vlnitosti bylo prováděno podle normy ČSN EN ISO 4287 na přístroji Taylor Hobson Form Talysurf 50. Délka měření byla dle normy stanovena na 12,5 mm. Měření bylo prováděno na té straně vzorku kde se nachází označení, jedná se tedy o radiální řez s číslem vzorku a stupněm zhuštění. Na měření bylo z každé skupiny zhuštění vybráno 15 vzorků a na každém vzorku byla provedena dvě měření podél vláken z jedné a druhé strany viz Obrázek č. 12.

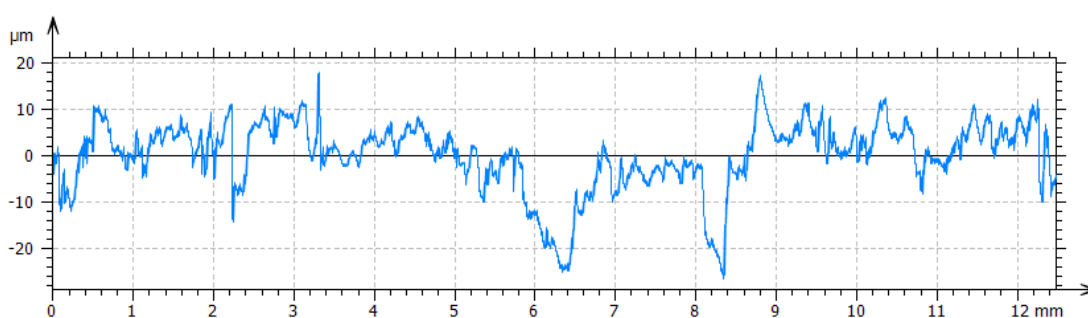


Obrázek č. 12 Naznačení směru měření drsnosti a vlnitosti podél vláken (Zdroj: Autor práce)



Obrázek č. 13 Měření drsnosti a vlnitosti metodou doteku pomocí hrotu na zařízení Taylor Hobson Form Talysurf 50 (Zdroj: Autor práce)

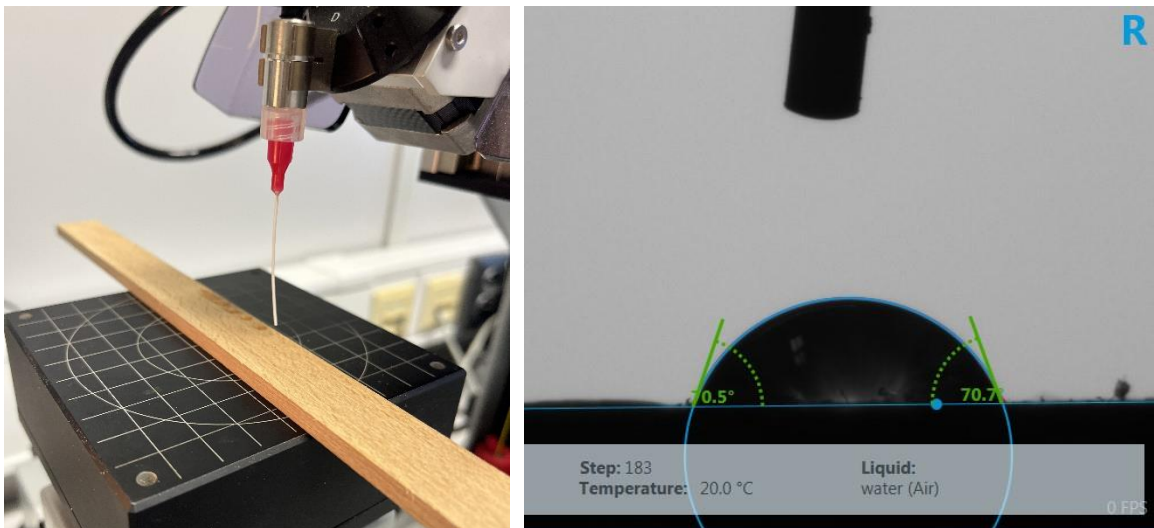
Na vzorcích byly zaznamenávány tyto následující parametry: R_a , R_z , W_a a R_{Sm} . Přičemž R_a je průměrná aritmetická odchylka profilu drsnosti. R_z je průměrná hloubka drsnosti (definována z 5 hodnot maximálních vzdáleností mezi prohlubněmi a vrcholy). W_a je vlnitost povrchu a R_{Sm} je délkový parametr značící průměrnou šířku prvků profilu (www.accretech.eu 2019). Na obrázku č. 14 lze vidět graf vybraného reprezentativního výstupu (R_a) měřeného podél vláken při 20 % stupni zhuštění.



Obrázek č. 14 Vybraný reprezentativní výstup parametru R_a u vzorku zhuštěného o 20 % (Zdroj: Autor práce)

4.5. Měření smáčivosti

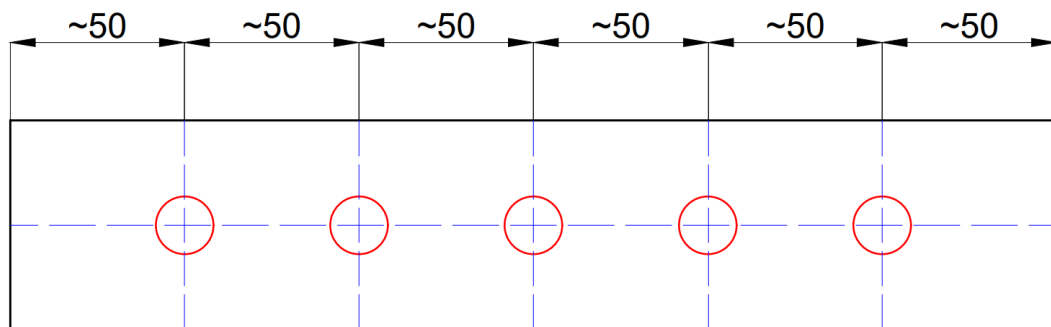
Smáčivost byla měřena metodou přisedlé kapky pomocí kontaktního úhlu na zařízení KRÜSS DSA30. Testování bylo prováděno pomocí destilované vody, přičemž velikost kapky byla nastavena na 5 μl . Kapky byly nanášeny na stejnou plochu jako v případě drsnosti a vlnitosti, jedná se tedy o plochu s radiálním řezem a označením vzorků. Z každé skupiny bylo vybráno 10 vzorků a na každém z nich bylo provedeno 5 měření. Měření bylo uskutečněno přibližně ve středu vzorku zhruba 5 mm od boční hrany. Kapky byly kladeny s takovým odstupem, aby nedocházelo k jejich vzájemnému kontaktu. Při dopadu kapky byla stanovena přibližná doba 5 vteřin. Po uplynutí této doby byl pořízen snímek a byla zaznamenána hodnota kontaktního úhlu pomocí dynamické tečnové metody. Na obrázku č. 15 na levé straně je možné vidět nanášení kapek destilované vody k okraji vzorku. Na obrázku č. 16 na pravé straně je možné vidět měření kontaktního úhlu dynamickou tečnovou metodou.



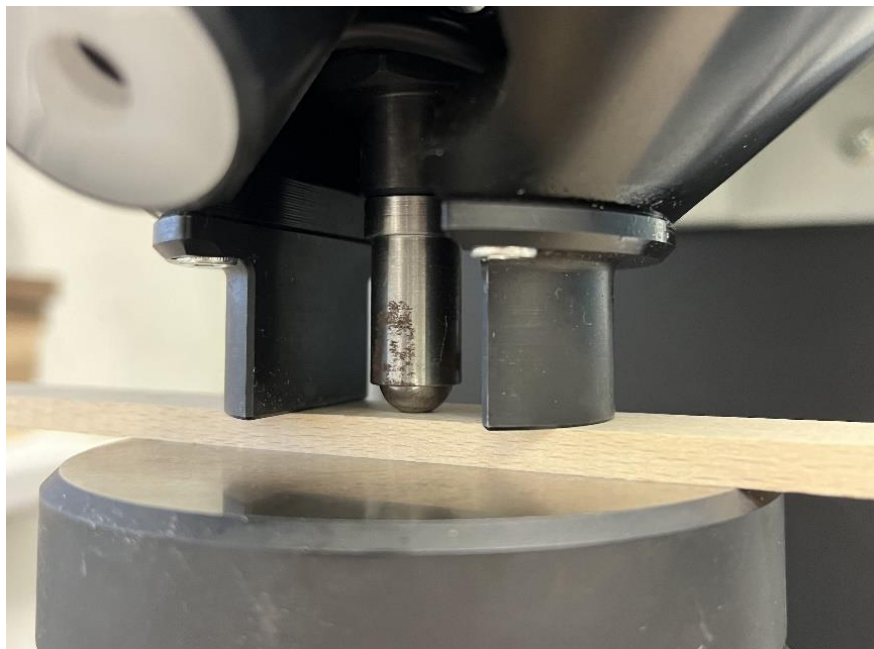
Obrázek č. 15 a 16 Nanášení kapek na povrch vzorku a pořízený snímek měření kontaktního úhlu dynamickou kapkovou metodou (Zdroj: Autor práce)

4.6. Měření tvrdosti

Měření tvrdosti bylo provedeno podle normy ČSN EN 1534 metodou podle Brinella. Tvrdost byla měřena na zařízení DuraVision-30. Průměr vtláčované ocelové kuličky činil 10 mm a vtláčovací síla byla nastavena na 500 N. Vzorky byly testovány na stejné ploše jako v případě předchozích zkoušek drsnosti, vlnitosti a smáčivosti. Z každé skupiny bylo vybráno 10 vzorků a každý vzorek byl měřen na 5 místech, v přibližně stejných rozestupech, přičemž všechna měření probíhala zhruba na středu vzorku viz Obrázek číslo 17.



Obrázek č. 17 Schématické znázornění přibližných bodů měření tvrdosti (Zdroj: Autor práce)



Obrázek č. 18 Měření tvrdosti Brinellovou metodou na zařízení DuraVision-30 (Zdroj: Autor práce)

5. Výsledky a diskuse

Před samotným statistickým vyhodnocováním výsledků byly vždy pro všechny parametry provedeny optické testy normality pomocí NP a Q-Q grafů. Tyto testy normality lze dohledat v přílohách práce. Pro určení statistické významnosti byla provedena ANOVA společně s post-hoc testem, přičemž byl zvolen Duncanův post-hoc test. Statistické vyhodnocování bylo provedeno v programu statistika a programu excel.

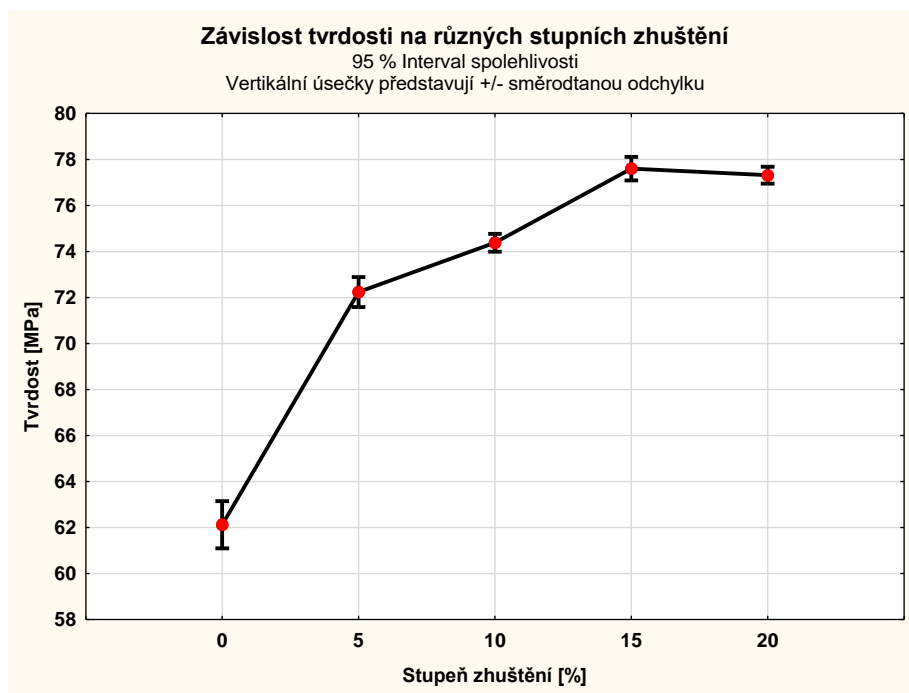
5.1. Vyhodnocení hustoty a tvrdosti podle Brinella

Pro každou skupinu lze z průměrné hodnoty hustoty před zhuštěním a průměrné hodnoty hustoty po zhuštění dopočítat procentuální nárůst hustoty, to lze vidět v tabulce č. 3. S každým vyšším stupněm zhuštění docházelo k navyšování hustoty dřeva. U 5 % stupně zhuštění nastal pouze nepatrný nárůst hustoty, mohlo totiž dojít pouze k povrchovému zhuštění vlivem nízkého kompresního poměru. Počáteční hustoty se od sebe poměrně odlišovali, důvodem může být obecně větší různorodost dřeva, vzorky také nemuseli být vymanipulovány se stejného stromu a stejných míst v rámci kmene.

Tabulka č. 3 Hustota zkušebních vzorků před a po zhuštění (Zdroj: Autor práce)

Stupeň zhuštění [%]	Průměrná hustota před zhuštěním [kg.m-3]	Průměrná hustota po zhuštění [kg.m-3]	Nárůst hustoty [%]
0	718,2	718,2	0
5	712,5	713,2	0,1
10	697,5	719,8	3,2
15	698,4	757,3	8,4
20	701,4	801,6	14,3

V případě tvrdosti došlo k potvrzení předpokladu, že se zvyšujícím se zhuštěním roste také tvrdost. Výjimka nastala pouze mezi posledním a předposledním stupněm zhuštění, kde došlo k malému poklesu tvrdosti, ovšem po provedení Dunanova testu, který je možné vidět v příloze č. 3 se zjistilo že tento výsledek není statisticky významný. Nejvyšší tvrdost tedy byla zaznamenána u 15 % stupně zhuštění. Hodnota tvrdosti v tomto stupni se zvýšila o téměř 25 % oproti průměrné tvrdosti nezhuštěných vzorků. Vývoj tvrdosti napříč jednotlivými stupni zhuštění lze spatřit na obrázku č.19.



Obrázek č. 19 Závislost mezi jednotlivými stupni zhuštění a tvrdostí (Zdroj: Autor práce)

Pro všechny stupně zhuštění lze vidět jejich hodnotu tvrdosti a také jejich procentuální nárůst tvrdosti v tabulce č. 4.

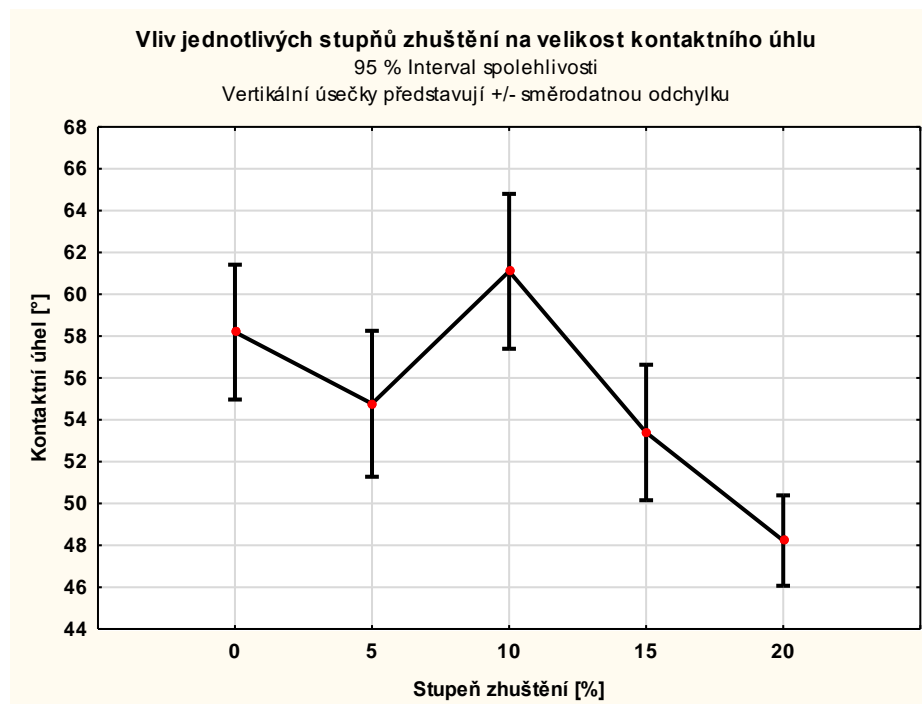
Tabulka č. 4 Závislost mezi stupni zhuštění a tvrdostí (Zdroj: Autor práce)

Stupeň zhuštění [%]	Průměrná tvrdost [MPa]	Nárůst tvrdosti [%]
0	62,12	0,0
5	72,24	16,3
10	74,38	19,7
15	77,6	24,9
20	77,32	24,5

Dömény a kol. (2014) provedly výzkum ve kterém zhušťovali termomechanickým způsobem bukové vzorky. Vzorky byly předem plastifikovány pomocí mikrovln v laboratorním zařízení s frekvencí 2,45 GHz a s různými výkony od 2 do 5 kW. Dřevo buku se z hustoty $648 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ dostalo po slisování na hustotu okolo $960 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Při výkonu kontinuálního laboratorního mikrovlnného zařízení 2 kW došlo po zhuštění k nárůstu tvrdosti o 57 %. Při výkonu 3,5 kW došlo ke zvýšení tvrdosti až o 103 %. Vzorky v této studii byly zhušťovány v tangenciálním směru.

5.2. Vyhodnocení smáčivosti povrchu metodou přisedlé kapky

Obecně s narůstajícím stupněm zhuštění by mělo docházet k navyšování kontaktního úhlu, a tedy snižování smáčivosti. Vlivem procesu termomechanického zhušťování totiž dochází ve vrstvách blízko povrchu k fyzikálním a chemickým procesům, které způsobují modifikaci povrchu a poskytují mu nové parametry (Bekhta a Krystofiak 2016). V této práci docházelo vlivem zhuštění k poklesu kontaktních úhlů, a tedy k zvyšování smáčivosti, tento průběh je možné vidět na obrázku č.20. Výjimka nastala mezi 5 % a 10 % stupněm zhuštění, kde došlo k výraznějšímu zvýšení kontaktního úhlu, tento výsledek je dle Duncanova testu (příloha č. 6) statisticky významný. Statistická nevýznamnost byla zaznamenána mezi referenčními vzorky a vzorky zhuštěnými o 5 %. Na obrázku č. 20 je také možné vidět poměrně velkou směrodatnou odchylku kterou představují vertikální úsečky. Na tomto obrázku lze také vidět že až od vyšších stupňů zhuštění dochází k výraznějším poklesům kontaktních úhlů. Ve skupině zhuštěné o 20 % se kontaktní úhel snížil o 17,1 % oproti nezhuštěným vzorkům.



Obrázek č. 20 Závislost mezi jednotlivými skupinami zhuštění a kontaktními úhly (Zdroj: Autor práce)

V tabulce č. 5 je možné vidět jednotlivé stupně zhuštění a jejich průměrný kontaktní úhel. Rovněž je zde také vidět procentuální nárůst nebo pokles kontaktních úhlů.

Tabulka č. 5 Závislost mezi stupni zhuštění a kontaktními úhly (Zdroj: Autor práce)

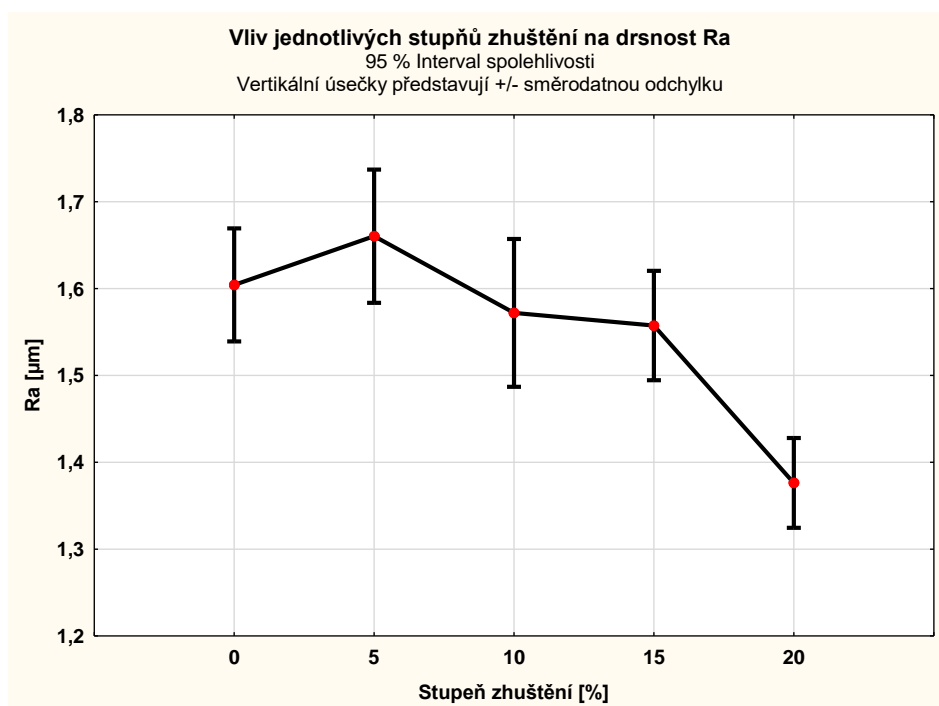
Stupeň zhuštění [%]	Průměrný kontaktní úhel [°]	Pokles (-) nebo nárůst (+) kontaktního úhlu [%]
0	58,2	0,0
5	54,8	-5,9
10	61,1	+5,0
15	53,4	-8,2
20	48,2	-17,1

Bekhta a Krystofiak (2016) provedli výzkum ve kterém zhutňovali různé dřeviny mezi kterými byl také buk lesní. Zhutňování bylo provedeno krátkodobým termomechanickým procesem. Teploty byly 100, 150 a 200 °C a lisovací tlaky 4, 8 a 12 MPa. Po zhuštění byla následně stanovena smáčivost povrchu, která byla měřena destilovanou vodou pomocí kontaktního úhlu. V této studii byl obecný trend takový, že s rostoucí teplotou a tlakem při zhušťování docházelo k zvyšování kontaktního úhlu. Bukové dřevo zhuštěné při teplotě 200 °C a tlaku 8 MPa dosáhlo kontaktního úhlu přibližně 65 ° naproti tomu bukové dřevo zhuštěné při teplotě 100 °C a tlaku 4 MPa dosáhlo kontaktního úhlu pouze okolo 20 °. Přičemž kontaktní úhel u nezhuštěných referenčních vzorků se zde pohyboval okolo 27 °.

Důvodů proč výsledky smáčivosti v této práci nepodléhají obecnému trendu může být hned několik. Prvním důvodem může být lisovací tlak, který mohl být oproti ostatním studiím odlišný. Dalším důvodem může být obecně velká různorodost dřeva, chemická heterogenita, porézní struktura a drsnost povrchu. Nemuselo také dojít k dostatečné modifikaci povrchu, která souvisí s dehydratací hemicelulóz, ligninu a extraktivních látek (Bekhta a Krystofiak 2016). V neposlední řadě mohl mít na výsledky vliv také faktor měření, a ne zcela přesná doba na pořízení snímku kontaktního úhlu a jeho zaznamenání.

5.3. Vyhodnocení drsnosti povrchu

V případě drsnosti byl dle předpokladu dosažen klesající průběh. Konkrétně u parametru Ra tedy docházelo se zvyšujícím se stupněm zhuštění k snižování drsnosti. Povrch se tedy stával hladší. Výjimka nastala pouze mezi 0 % a 5 % stupněm zhuštění, kde došlo k navýšení drsnosti. Mezi referenčními vzorky a vzorky zhuštěnými o 5 % ovšem nebyla prokázána statistická významnost, stejně tak tomu bylo i mezi dalšími stupni zhuštění, to je patrné z Duncanova post-hoc testu, který lze najít v příloze č. 9.



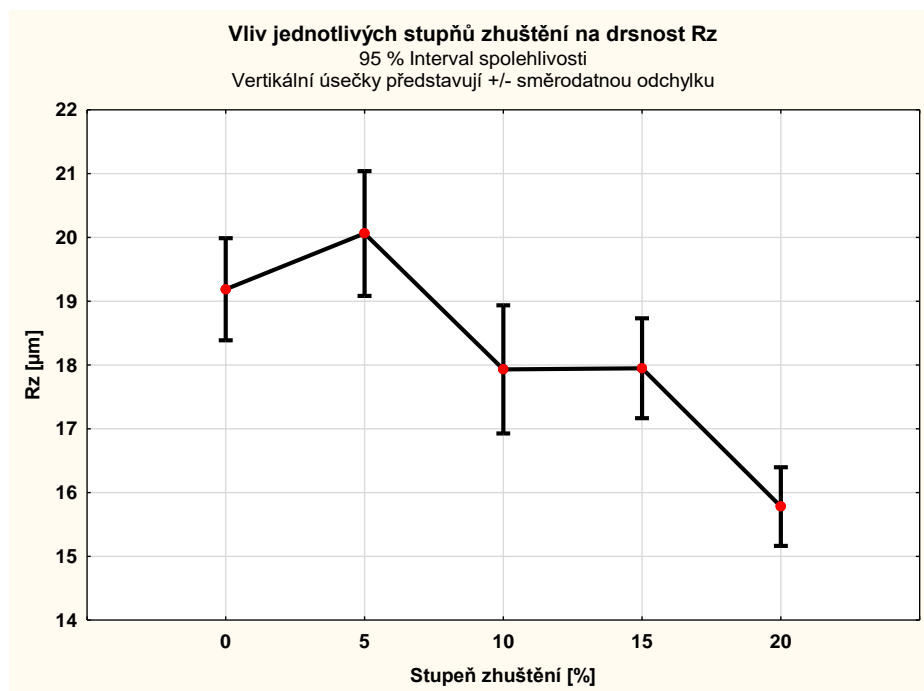
Obrázek č. 21 Závislost mezi jednotlivými skupinami zhuštění a parametrem drsnosti Ra (Zdroj: Autor práce)

Vývoj parametru drsnosti Ra napříč jednotlivými stupni zhuštění je možné pozorovat na obrázku č. 21 a v tabulce č. 6 kde jsou viditelné také procentuální změny.

Tabulka č. 6 Závislost mezi stupni zhuštění a parametrem drsnosti Ra (Zdroj: Autor práce)

Stupeň zhuštění [%]	Průměrná drsnost Ra [μm]	Pokles (-) nebo nárůst (+) drsnosti [%]
0	1,61	0
5	1,66	+3,0
10	1,60	-0,4
15	1,53	-4,9
20	1,38	-14,4

Parametr drsnosti Rz reprezentující maximální výšku profilu měl podobný průběh jako parametr Ra, to lze vidět na obrázku č. 22.



Obrázek č. 22 Závislost mezi jednotlivými skupinami zhuštění a parametrem drsnosti Rz (Zdroj: Autor práce)

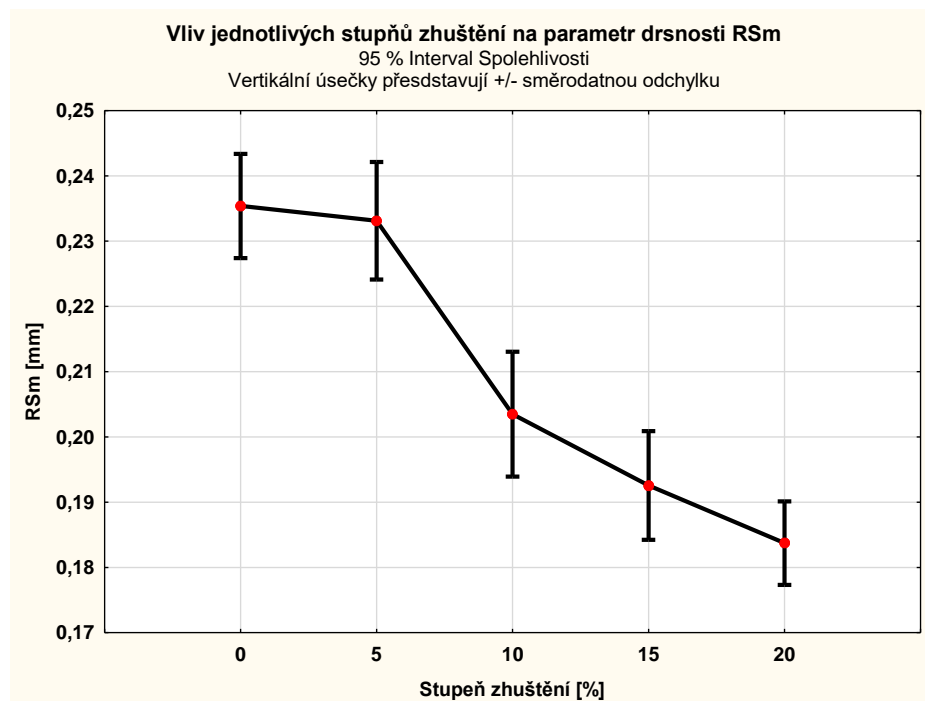
Se zvyšujícím se stupněm zhuštění se snižovala drsnost také u parametru Rz. Mezi 5 % a 10 % stupněm zhuštění došlo k výraznému poklesu drsnosti, stejně tak k tomu došlo i mezi předposledním a posledním stupněm. Mezi referenčními zkušebními tělesy a prvním stupněm zhuštěním nedošlo ke snížení drsnosti. Tento výsledek ovšem není statisticky významný, dle Duncanova post-hoc testu (příloha č. 12). Mezi dalšími stupni zhuštění nebyla rovněž potvrzena statistická významnost, stejně tak jako u parametru Ra.

Tabulka č. 7 Závislost mezi stupni zhuštění a parametrem drsnosti Rz (Zdroj: Autor práce)

Stupeň zhuštění [%]	Průměrná drsnost Rz [µm]	Pokles (-) nebo nárůst (+) drsnosti [%]
0	19,27	0
5	19,69	+2,2
10	17,91	-7,1
15	17,74	-7,9
20	15,78	-18,1

Kúdela a kol. (2017) studovali vliv různých podmínek při lisování bukového dřeva na jeho vlastnosti. Mezi zkoumanými vlastnostmi byla také drsnost povrchu, konkrétně parametr Ra a Rz. Obecně zde byl vývoj takový že s rostoucím kompresním poměrem docházelo ke snižování drsnosti. Drsnost byla měřena ve směru rovnoběžně s vlákny pomocí kontaktního profilometru. Zjistilo se, že také teplota má významný vliv na drsnost povrchu. Při 20 % kompresi a času lisování 12 minut docházelo s postupnou zvyšující se teplotou k snižování drsnosti. Konkrétně parametr Rz dosáhl po zhušťování při teplotě 160 °C hodnotu okolo 16,5 μm. Při teplotě 220 °C se tato hodnota již pohybovala v rozmezí 12,4 μm. S rostoucí teplotou docházelo k mírnému poklesu i u parametru Ra, který se při teplotě zhuštění 160 °C pohyboval okolo 3,5 μm a při teplotě 220 °C okolo 2,5 μm. Při 40 % kompresi při teplotě 160 °C se parametr Rz pohyboval okolo 12,5 μm a při teplotě 220 °C okolo 8,5 μm (Kúdela a kol. 2017).

V případě šířkového parametru RSm docházelo vždy s narůstajícím stupněm zhuštění k poklesu. Klesající trend je možné vidět na obrázku č. 23.



Obrázek č. 23 Závislost mezi jednotlivými skupinami zhuštění a parametrem drsnosti RSm
 (Zdroj: Autor práce)

U šířkového parametru drsnosti RSm byl zaznamenán největší pokles mezi 5 % a 10 % stupněm zhuštění. Mezi těmito stupni se parametr drsnosti RSm snížil o 9,3 %. Naproti tomu mezi referenčními vzorky a vzorky zhuštěnými o 5 % se tento parametr drsnosti snížil pouze o 3,8 %. Duncanův post-hoc test je možné vidět v příloze č. 15. Statistická nevýznamnost byla prokázána mezi skupinou 0 % a 5 % zhuštění. Mezi stupni 10 % až 20 % nebyla rovněž prokázána statistická významnost. V tabulce č. 8 lze vidět snižující se hodnoty parametru drsnosti RSm a jejich procentuální pokles.

Tabulka č. 8 Závislost mezi stupni zhuštění a parametrem drsnosti RSm (Zdroj: Autor práce)

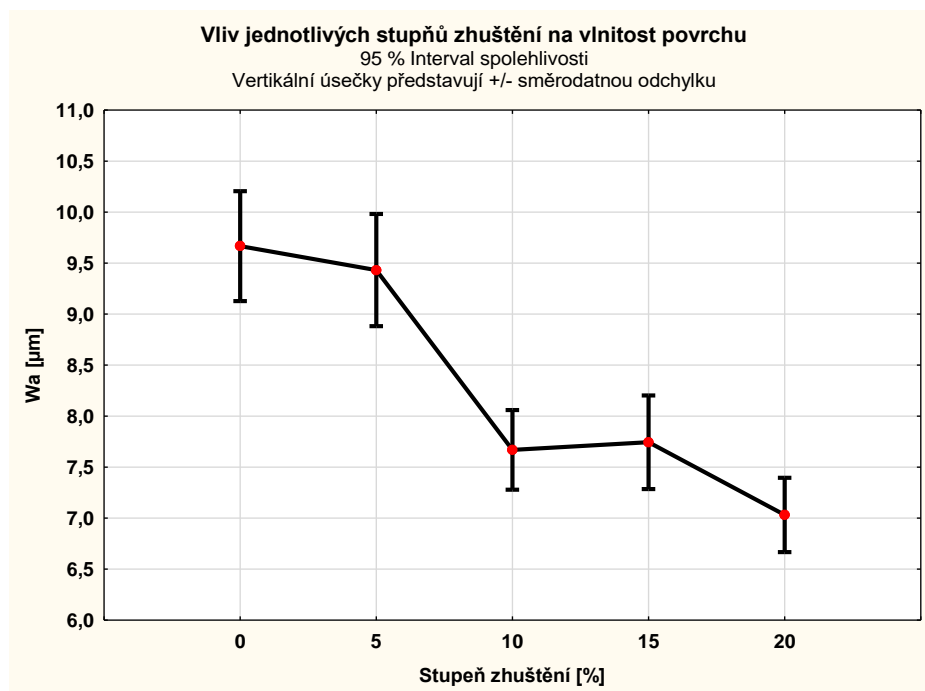
Stupeň zhuštění [%]	Průměrná drsnost RSm [mm]	pokles drsnosti parametru RSm [%]
0	0,235	0
5	0,226	-3,8
10	0,205	-12,8
15	0,190	-19,1
20	0,184	-21,7

Kúdela a kol. (2019) vyhodnocovali různé povrchové vlastnosti bukového dřeva, které bylo modifikováno pomocí CO2 laseru. Mimo jiné hodnotily taky parametr RSm. Drsnost byla měřena rovnoběžně s vlákny a v případě nejnižšího výkonu laseru bylo dosaženo hodnoty 0,8003 mm. Při největší dávce ořezu, a tedy nejvyšším výkonu laseru bylo dosaženo hodnot 0,628 mm.

5.4. Vyhodnocení vlnitosti povrchu

Vlnitost povrchu lze po statistickém vyhodnocení pozorovat na obrázku číslo č. 24. Vlnitost měřena podél vláken se dle očekávání s rostoucím stupněm zhuštění snižuje. Mezi stupni 5 % a 10 % zhuštění došlo k velkému poklesu vlnitosti, konkrétně o 17,9 %. Mezi následujícími stupni byla zaznamenána stejná hodnota, nedošlo tedy k poklesu vlnitosti. Na obrázku č. 24 je dokonce možné vidět nárůst vlnitosti, který je zde z důvodu nastavení neváženého průměru. Mezi referenční skupinou a skupinou zhuštěnou o 5 % nebyla prokázána statistická významnost, to lze vidět v příloze č. 18.

Dále mezi stupni od 10 % zhuštění po zhuštění o 20 % nebyla rovněž prokázána statistická významnost.



Obrázek č. 24 Závislost mezi jednotlivými skupinami zhuštění a vlnitostí povrchu (Zdroj: Autor práce)

V tabulce číslo 9. je možné vidět jednotlivé hodnoty vlnitosti W_a a také jejich procentuální pokles

Tabulka č. 9 Závislost mezi stupni zhuštění a vlnitostí (Zdroj: Autor práce)

Stupeň zhuštění [%]	Průměrná vlnitost [mm]	pokles vlnitosti [%]
0	9,67	0
5	9,43	-2,4
10	7,74	-19,9
15	7,74	-19,9
20	7,03	-27,3

Adamčík a jeho kolegové (2022) zkoumali vliv tepelného zpracování na kvalitu vytvořeného povrchu bukového dřeva. Pod pojmem tepelné zpracování se zde myslí napařování vzorků sytou párou v tlakovém autoklávu. Mezi vzorky neupravenými a vzorky které byly napařovány při teplotě 105 °C došlo k 43,12 % snížení vlnitosti. V případě napařování při teplotách 125 a 135 °C již nedošlo k dalšímu snižování zvlnění profilu.

Závěry a přínosy

Po důkladné statistické analýze byl prokázán vliv procesu zhušťování na jednotlivé zkoumané vlastnosti. V případě tvrdosti docházelo s navyšujícím se stupněm zhuštění k nárůstu. Nejvyšší procentuální nárůst tvrdosti byl zaznamenán u 15 % stupně zhuštění, zde se tvrdost zvýšila o téměř 25 % oproti vzorkům nezhuštěným. Mezi předposledním a posledním stupněm zhuštění nenastal nárůst tvrdosti, u tohoto výsledku ovšem nebyla prokázána statistická významnost. U zhuštěného dřeva také docházelo ke změnám na povrchové úrovni. Konkrétně parametr drsnosti Ra a Rz měl podobný klesající průběh napříč úrovněmi zhuštění. Výjimka nastala pouze mezi referenčními vzorky a vzorky zhuštěnými o 5 %, kde došlo k zvýšení drsnosti. Po provedení Duncanova testu se ovšem nepotvrdila statistická významnost. Největší pokles drsnosti byl zaznamenán u 20 % stupně zhuštění, kde byla drsnost oproti referenčním vzorkům snížena až o 14,4 % v případě parametru Ra a o 18,1 % v případě parametru Rz. Šířkový parametr drsnosti RSm měl pravidelný klesající průběh, přičemž nejvyšší pokles nastal mezi 5 % a 10 % stupněm zhuštění. Vlnitost povrchu se také snižovala vlivem zhuštění. Největší pokles vlnitosti byl zaznamenán mezi 5 % a 10 % stupněm zhuštění, a to až o 17,9 %. Klesající průběh vlnitosti byl narušen pouze mezi 10 % a 15 % stupněm zhuštění. Duncanův test zde ovšem nepotvrdil statistickou významnost. V případě smáčivosti povrchu, nebylo dosaženo obecného trendu. Kontaktní úhly mezi jednotlivými stupni zhuštění postupně klesali. Mezi 5 % a 10 % stupněm došlo k nárůstu kontaktního úhlu. Obecně se tedy povrch po zhuštění stával tvrdší, hladší a méně hydrofobní. Méně hydrofobní povrch může pozitivně ovlivnit adhezi potřebnou k lepení. Také povrchové úpravy nátěrem mohou být zjednodušeny v důsledku zvýšené smáčivosti, nátěrová hmota má totiž tendenci lépe přilnout a rozprostřít se.

Tato práce může být přínosná pro oblast výroby dřevěných podlah, kde může být využita převážně zvýšená tvrdost dosažená procesem zhuštění. Podlahy s takto zvýšenou tvrdostí mohou lépe odolávat opotřebení a otěru, a může se tak prodloužit jejich životnost. V oblasti stavebnictví je zvýšená tvrdost a odolnost pozitivním faktorem, zhušťované dřevo by se tak mohlo zařazovat do různých konstrukcí kde jsou vyžadovány extrémní požadavky. Takto modifikované dřevo by také mohlo začít nahrazovat různé nedřevěné materiály, u kterých není vždy ekologická výroba a jejichž zdroje jsou omezeny. Tato práce může být dále přínosná v oblasti spojování dřevěných prvků lepením a v oblasti povrchových úprav. Drsnost povrchu a jeho smáčivost mají

významný vliv na adhezní a kohezní síly ve spoji, které úzce souvisí s kvalitou samotného spoje. Hladkost povrchu pak dále ovlivňují také schopnost jednotlivých nátěrů přilnout a také kvalitně se rozetřít. Proces zhušťování může z takto dostupného a obnovitelného materiálu který má ovšem také svá omezení vytvořit zcela nový vylepšený produkt který získá celou řadu nových a pozitivních vlastností. Méně kvalitní dřeviny, které nemají příliš velké využití mohou být najednou používány ve zcela jiných oblastech. Tyto modifikované produkty tak začínají konkurovat běžným materiálům a jejich hlavní výhodou je jejich přírodní a obnovitelný charakter. Mezi jednu z hlavních nevýhod zhušťování dřeva je velká propast mezi dosavadními studiemi a velkosériovou komerční výrobou, tato propast je zapříčiněna hlavně anizotropní povahou dřeva. Je jen otázkou času kdy se vyřeší problémy související s automatizací a sériovou výrobou a tyto modifikované produkty tak budou ve větší míře dostupné na trhu.

Pro komplexní charakterizaci povrchu by se v budoucím výzkumu mohla změřit také celková povrchová energie. Kromě měření kontaktního úhlu destilovanou vodou by se přidalo také měření kontaktního úhlu ethanolem. Povrchová energie by mohla poskytnout doplňující informace o povrchových vlastnostech dřeva. Tato energie totiž úzce souvisí s adhezí a kohezí materiálu a také například s korozní odolností. Dále by se také mohla zjišťovat změna struktury dřeva například pomocí mikroskopie.

Přehled literatury a použitých zdrojů

1. ČSN EN 1534 (492124) Dřevěné podlahoviny – Stanovení odolnosti proti vtisku – Metoda zkoušení. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020.
2. ČSN EN ISO 4287 (014450) Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda – Termíny, definice a parametry struktury povrchu. Praha: Český normalizační institut, 1999.
3. ACCRETECH. Měření struktury povrchu. *Accretech.eu* [online]. 2019 [cit. 2024-03-19]. Dostupné z: <https://www.accretech.eu/cs/mereni-struktury-povrchu/>
4. ADAMČÍK, Lukáš, Richard KMINIAK a Adrián BANSKI. The effect of thermal modification of beech wood on the quality of milled surface. *Acta facultatis xylogologiae Zvolen*. 2022, **64**(2), 57–67. DOI:10.17423/afx.2022.64.2.06
5. ATILGAN, Abdi, Erol BURDURLU, Musa ATAR a Sekip YASAR. The Effect of the Mechanical Densification Process in Wood Material on the Surface Adhesion Resistance of Varnishes. *Research Square*. 2024, 2-13. DOI:10.21203/rs.3.rs-3909021/v1
6. BEJŠÁK, Dominik. Zhušťování dřeva a jeho dopad na změnu tvrdosti a kvality povrchu. 2022, Bakalářská práce. Česká zemědělská univerzita v Praze.
7. BEKHTA, Pavlo a Tomasz KRYSTOFIAK. The influence of short-term thermo-densification on the surface wettability of wood veneers. *Maderas*. 2015, **18**(1), 79-90. DOI:10.4067/S0718-221X2016005000008
8. BEKHTA, Pavlo, Stanisław PROSZYK, Tomasz KRYSTOFIAK, Jan SEDLIACIK, Igor NOVAK a Miroslava MAMONOVA. Effects of short-term thermomechanical densification on the structure and properties of wood veneers. *Wood material science & engineering*. 2015, **12**(1), 40-54. DOI:10.1080/17480272.2015.1009488

9. BIOLIN SCIENTIFIC. What is wettability? *Biolinscientific.com* [online]. 2019 [cit. 2024-03-19]. Dostupné z: <https://www.biolinscientific.com/blog/what-is-wettability>
10. DÖMÉNY, Jakub, Vojtěch KOIŠ a Miroslav ZAPLETAL. Application of Microwave Treatment for the Plasticisation of Beech Wood (*Fagus sylvatica* L.) and its Densification for Flooring System Purposes. *BioResources*. 2014, **9**(4), 7519-7528. DOI:10.15376/biores.9.4.7519-7528
11. Dřevo - základní fyzikální vlastnosti dřeva. *Homel.vsb.cz* [online]. [cit. 2024-03-19]. Dostupné z: https://homel.vsb.cz/~khe0007/opory/opory.php?stranka=drevo_zk
12. FANG, Chang-Hua, Alain CLOUTIER, Ze-Hui JIANG, Jia-Zhong HE a Ben-Hua FEI. Improvement of Wood Densification Process via Enhancing Steam Diffusion, Distribution, and Evaporation. *BioResources*. 2019, **14**(2), 3278-3288. DOI:10.15376/biores.14.2.3278-3288
13. GANDELOVÁ, Libuše, Petr HORÁČEK a Jarmila ŠLEZINGEROVÁ. *Nauka o dřevě*. 2. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 2002. ISBN 80-7157-577-1.
14. GURAU, Lidia a Mark IRLE. Surface Roughness Evaluation Methods for Wood Products: a Review, *Current forestry reports*. 2017, **3**, 119–131. DOI:10.1007/s40725-017-0053-4
15. HEGER, Frédéric, Fred GIRARDET, Christian WELZBACHER, Andreas RAPP a Parviz NAVI. Mechanical and Durability Performance of THM-Densified Wood [online]. *Final workshop COST action E*. 2004, **22**, 1-10 [cit. 2024-03-19]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/profile/Parviz-Navi/publication/268011700_Mechanical_and_Durability_Performance_of_THM-Densified_Wood/links/547c17c80cf2a961e489cb7a/Mechanical-and-Durability-Performance-of-THM-Densified-Wood.pdf

16. HORÁČEK, Petr. Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva. 1. Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 1998. ISBN 80-7157-347-7.
17. INSULCUT SERVICES. Densified wood - permalli. *Insulcut.com.au* [online]. 2024 [cit. 2024-03-19]. Dostupné z: <https://www.insulcut.com.au/densified-wood-permalli/>
18. KÚDELA, Jozef, Ladislav REINPRECHT, Zuzana VIDHOLDOVÁ a Michal ANDREJKO. Surface properties of beech wood modified by CO2 laser. *Acta Facultatis Xylogologiae Zvolen res Publica Slovaca*. 2019, **61**(1), 5–18. DOI:10.17423/afx.2019.61.1.01
19. KÚDELA, Jozef, Marek REŠETKA, Peter RADEMACHER a Aleš DEJMAL. Influence of pressing parameters on surface properties of compressed beech wood. *Wood research* [online]. 2017, **62**(6), 939-950 [cit. 2024-03-19]. Dostupné z: <http://www.woodresearch.sk/wr/201706/11.pdf>
20. KUTNAR, Andreja, Frederick KAMKE a Milan SERNEK. The mechanical properties of densified VTC wood relevant for structural composites. *Holz als Roh- und Werkstoff*. 2008, **66**(6), 439–446. DOI:10.1007/s00107-008-0259-z
21. LASKOWSKA, Agnieszka. Density profile and hardness of thermo-mechanically modified beech, oak and pine wood. *Drewno. Prace Naukowe. Doniesienia. Komunikaty*. 2020, **63**(205). DOI:10.12841/wood.1644-3985.D06.08
22. LUAN, Yu, Chang-Hua FANG, Yi-Fan MA a Ben-Hua FEI. Wood mechanical densification: a review on processing. *Materials and Manufacturing Processes*. 2022, **37**(4), 359-371. DOI:10.1080/10426914.2021.2016816
23. SYDOR, Maciej, Grzegorz PINKOWSKI a Anna JASIŃSKA. The Brinell method for determining hardness of wood flooring materials. *Forests*. 2020, **11**(8), 878. DOI:10.3390/f11080878

24. MORSING, Niels. *Densification of wood: The influence of hygrothermal treatment on compression of beech perpendicular to grain* [online]. Technická univerzita v Dánsku, 1998 [cit. 2024-03-19]. ISBN 87-7740-294-4. Dostupné z: <https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/5301406/Morsing.pdf>
25. NEYSES, Benedikt. *Surface-Densified Wood: From Laboratory-Scale Research Towards a Competitive Product* [online]. Doktorská práce. Luleå University of Technology. 2016 [cit. 2024-03-19]. ISBN 978-91-7583-758-1. Dostupné z: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1045759/FULLTEXT01.pdf>
26. PEETHAN, Alina, M. ARAVIND a Sajan GEORGE. *Surface Wettability and Superhydrophobicity*. 2023. ISBN 978-1-83767-003-1. DOI:10.1039/9781837670031-00001
27. POŽGAJ, Alexander, Dušan CHOVANEC, Stanislav KURJATKO a Marián BABIAK. *Štruktúra a vlastnosti dřeva*. 1. Bratislava: Příroda, 1993. ISBN 80-07-00600-1.
28. RUDAK, Oksana, Stefan BARCIK, Pavel RUDAK, Vadzim CHAYEUSKI a Peter KOLEDA. *Densification of Wood – Chemical and Structural Changes Due to Ultrasonic and Mechanical Treatment*. *BioResources*. 2021, **16**(4), 8379-8393. DOI: 10.15376/biores.16.4.Rudak
29. SANDAK, Jakub a Negri MARTINO. *Wood surface roughness – what is it?* [online]. 2005 [cit. 2024-03-19]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/267805159_Wood_surface_roughness_-_what_is_it
30. SCIAM. *Stronger Than Steel, Able to Stop a Speeding Bullet*. *Scientificamerican.com* [online]. 2018 [cit. 2024-03-19]. Dostupné z: <https://www.scientificamerican.com/article/stronger-than-steel-able-to-stop-a-speeding-bullet-mdash-it-rsquo-s-super-wood/>

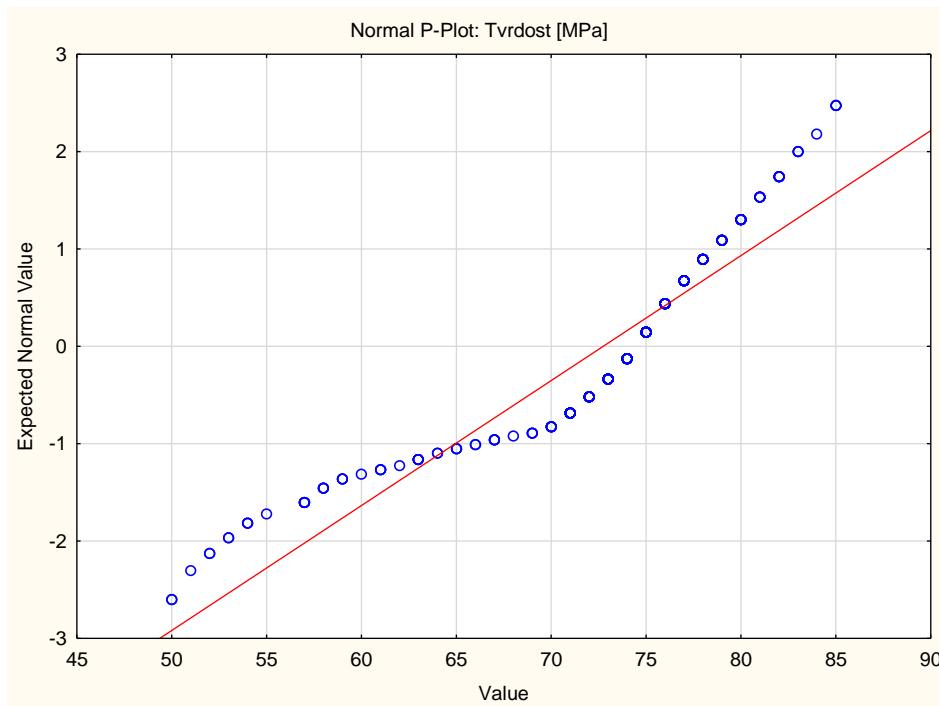
31. SEBORG, R., M. MILLETT a A. STAMM. Heat-stabilized Compressed Wood (STAYPAK) [online]. Forest Products Laboratory, Forest Service U. S. Department of Agriculture, 1956 [cit. 2024-03-19].
32. SCHARF, Alexander, Benedikt NEYSES a Dick SANDBERG. Continuous densification of wood with a belt press: the process and properties of the surface-densified wood. *Wood Material Science & Engineering*. 2023, **18**(4), 1573–1586. DOI:10.1080/17480272.2023.2216660
33. SCHWARZKOPF, Matthew. Densified wood impregnated with phenol resin for reduced set-recovery. *Wood Material Science & Engineering*. 2021, **16**(1), 35-41. DOI: 10.1080/17480272.2020.1729236
34. SICHALERN, Oudone, Louxiong SIAKOR, Khanxay KHAMMANIVONG a Khonethong SOUPHAXAY. A preliminary evaluating the effect of pressing temperature and pressure on wood densification of rubber wood. 2021. DOI:10.13140/RG.2.2.12657.35683
35. SIKORA, Adam. Základní mechanické charakteristiky kompozitních materiálů na bázi dřeva a nedřevních komponentů. Praha, 2021, Disertační práce. Česká zemědělská univerzita v Praze.
36. SUSTAINABLE LUMBER COMPANY. WOOD IS THE MOST RENEWABLE RESOURCE. *Sustainablelumberco.com* [online]. 2017 [cit. 2024-03-14]. Dostupné z: <https://www.sustainablelumberco.com/2017/06/wood-renewable-resource/>
37. ŠERNEK, Milan a Andreja KUTNAR. Densification of wood [online]. Biotechnická fakulta: Rožna dolina, 2007, **82**, 53-62 [cit. 2024-03-19]. Dostupné z: <http://eprints.gozdis.si/198/1/zbgl%2D82%2D6.pdf>
38. TENORIO, Carolina a Roger MOYA. Effect of Thermo-hydro-mechanical Densification on the Wood Properties of Three Short-rotation Forest Species in Costa Rica. *BioResources*. 2020, **15**(4), 8065-8084. DOI:10.15376/biores.15.4.8065-8084

39. ÚSTAV PRO HOSPODÁŘSKOU ÚPRAVU LESŮ BRANDÝS NAD LABEM.
Listnaté dřeviny tvoří 38,7 % českých lesů. *Uhul.cz* [online]. 2022 [cit. 2024-03-14]. Dostupné z: <https://www.uhul.cz/listnate-dreviny-tvori-387-ceskych-lesu/>
40. VÖRÖS, Á. a R. NÉMETH. The History of Wood Hardness Tests. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020, **505**. DOI:10.1088/1755-1315/505/1/012020
41. WANG, Jiajun, Yubo CHAI, Junliang LIU a J. ZHU. The Viscoelastic and Hygroscopicity Behavior of Delignified and Densified Poplar Wood. *Forests*. 2023, **14**(9), 1721. DOI:10.3390/f14091721
42. ZEIDLER, Aleš a Vlastimil BORŮVKA. Stavba a vlastnosti dřeva hospodářsky významných dřevin - podklady pro cvičení. 1. Česká zemědělská univerzita v Praze, 2016. ISBN 978-80-213-2674-3.
43. ZOTTI, Aldobenedetto, Simona ZUPPOLINI, Mauro ZARRELLI a Anna BORRIELLO. Fracture Toughening Mechanisms in Epoxy Adhesives. *Adhesives-Applications and Properties*. 2016, 1, 257. DOI:10.5772/65250
44. ФЕДОРОВА, А. а С. ВАСИЛЬЕВ. Измерение волнистости поверхностей мехатронным профилографом. 2021, **4**(60), 83-93. DOI:10.21685/2072-3059-2021-4-7

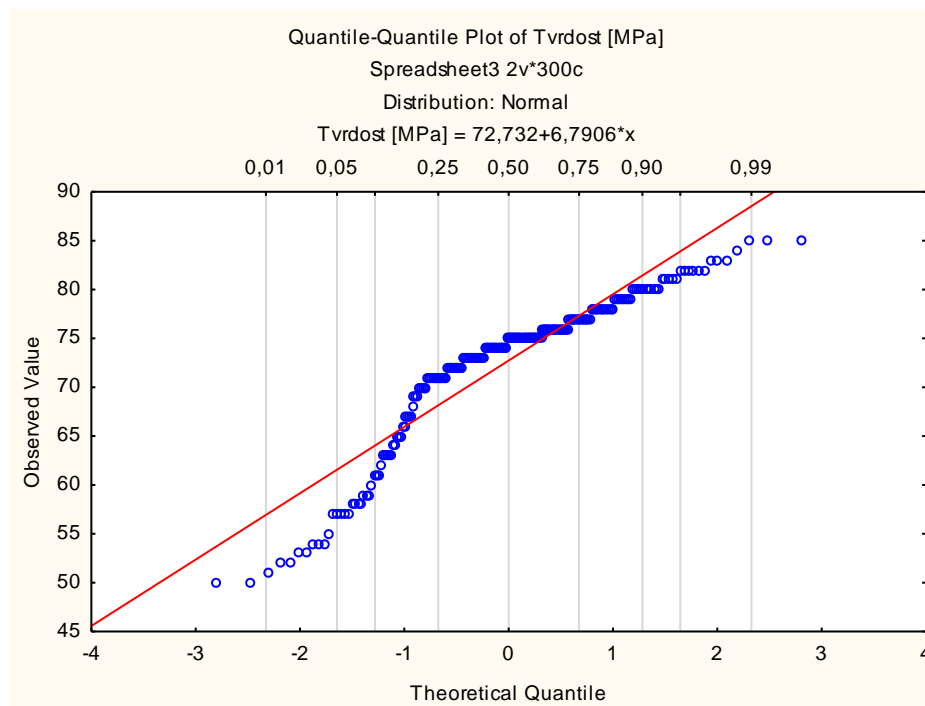
Seznam příloh

- Příloha č. 1 - Optické testy normality pomocí NP grafu (Tvrдост dle Brinella)
- Příloha č. 2 - Optické testy normality pomocí Q-Q grafu (Tvrдост dle Brinella)
- Příloha č. 3 - Duncanův post-hoc test pro tvrдост
- Příloha č. 4 - Optické testy normality pomocí NP grafu (Smáčivost)
- Příloha č. 5 - Optické testy normality pomocí Q-Q grafu (Smáčivost)
- Příloha č. 6 - Duncanův post-hoc test pro smáčivost
- Příloha č. 7 - Optické testy normality pomocí NP grafu (parametr drsnosti Ra)
- Příloha č. 8 - Optické testy normality pomocí Q-Q grafu (parametr drsnosti Ra)
- Příloha č. 9 - Duncanův post-hoc test pro parametr drsnosti Ra
- Příloha č. 10 - Optické testy normality pomocí NP grafu (parametr drsnosti Rz)
- Příloha č. 11 - Optické testy normality pomocí Q-Q grafu (parametr drsnosti Rz)
- Příloha č. 12 - Duncanův post-hoc test pro parametr drsnosti Rz
- Příloha č. 13 - Optické testy normality pomocí NP grafu (parametr drsnosti RSm)
- Příloha č. 14 - Optické testy normality pomocí Q-Q grafu (parametr drsnosti RSm)
- Příloha č. 15 - Duncanův post-hoc test pro parametr drsnosti RSm
- Příloha č. 16 - Optické testy normality pomocí NP grafu (parametr vlnitosti Wa)
- Příloha č. 17 - Optické testy normality pomocí Q-Q grafu (parametr vlnitosti Wa)
- Příloha č. 18 - Duncanův post-hoc test pro parametr vlnitosti Wa
- Příloha č. 19 - Tloušťkovací frézka SCM s630 class
- Příloha č. 20 - Měření a vážení zkušebních vzorků
- Příloha č. 21 - Zhušťování vzorků na hydraulickém lise TOS Rakovník

Příloha č. 1 Optické testy normality pomocí NP grafu (Tvrдост dle Brinella)



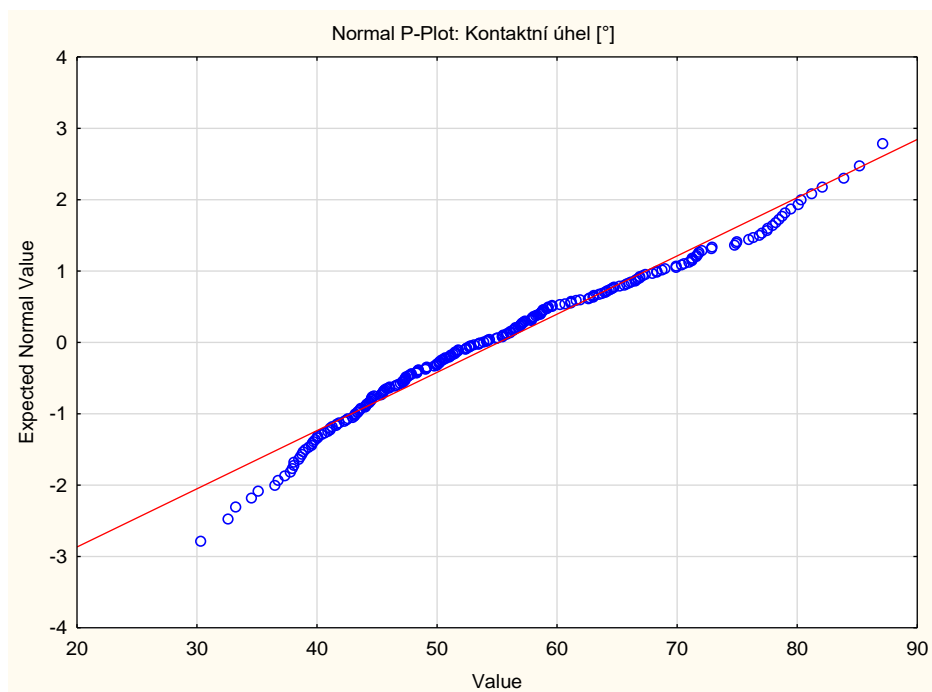
Příloha č. 2 Optické testy normality pomocí Q-Q grafu (Tvrдост dle Brinella)



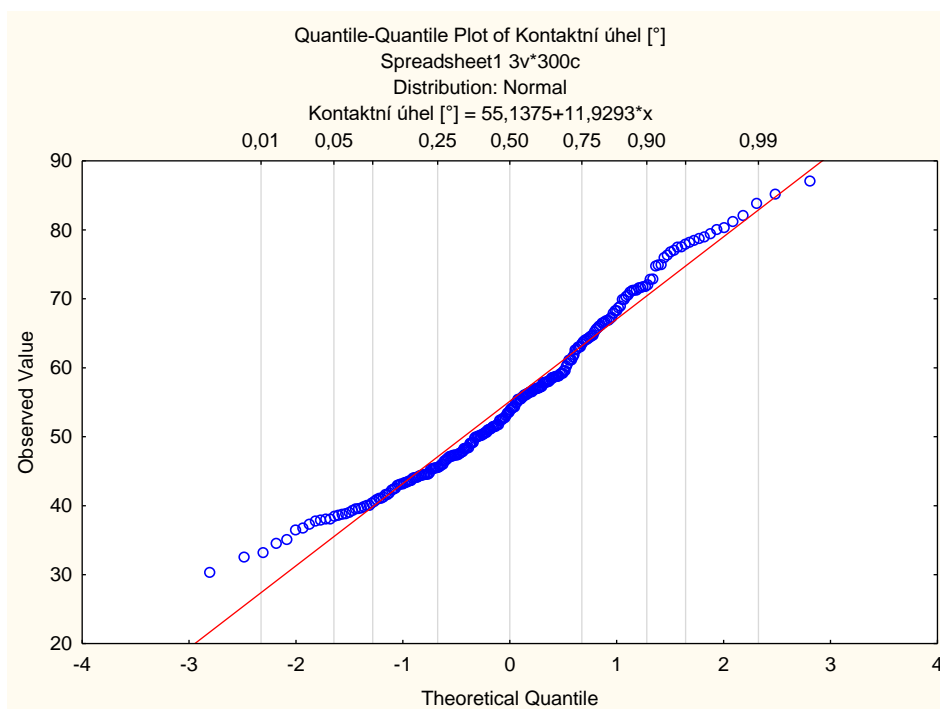
Příloha č. 3 Duncanův post-hoc test pro tvrdost

Číslo buňky	Stupeň zhuštění [%]	{1}	{2}	{3}	{4}	{5}
1	0		0,000009	0,000011	0,000004	0,000003
2	5	0,000009		0,017424	0,000003	0,000011
3	10	0,000011	0,017424		0,000511	0,001093
4	15	0,000004	0,000003	0,000511		0,755722
5	20	0,000003	0,000011	0,001093	0,755722	

Příloha č. 4 Optické testy normality pomocí NP grafu (Smáčivost)



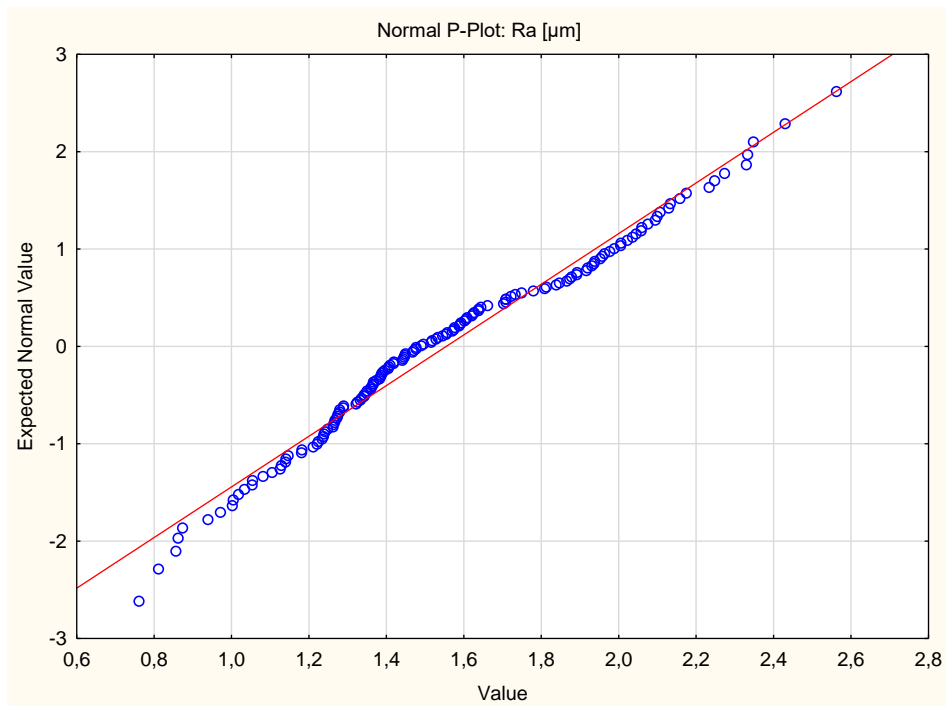
Příloha č. 5 Optické testy normality pomocí Q-Q grafu (Smáčivost)



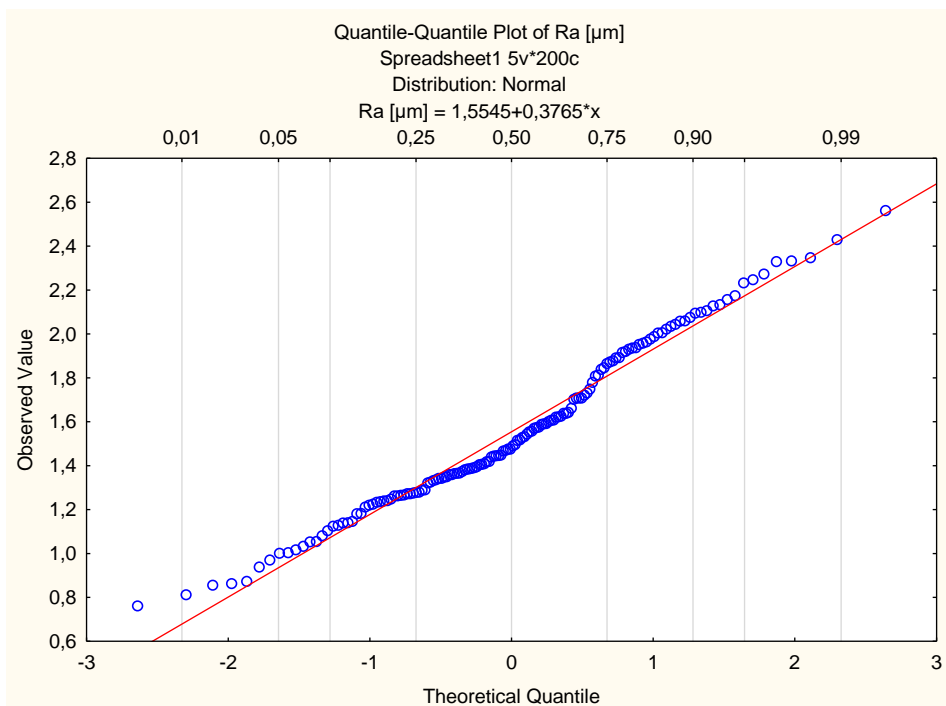
Příloha č. 6 Duncanův post-hoc test pro smáčivost

Číslo buňky	Stupeň zhuštění [%]	{1}	{2}	{3}	{4}	{5}
1	0		0,129094	0,198118	0,043289	0,000022
2	5	0,129094		0,007003	0,543259	0,005268
3	10	0,198118	0,007003		0,001204	0,000004
4	15	0,043289	0,543259	0,001204		0,022041
5	20	0,000022	0,005268	0,000004	0,022041	

Příloha č. 7 Optické testy normality pomocí NP grafu (parametr drsnosti Ra)



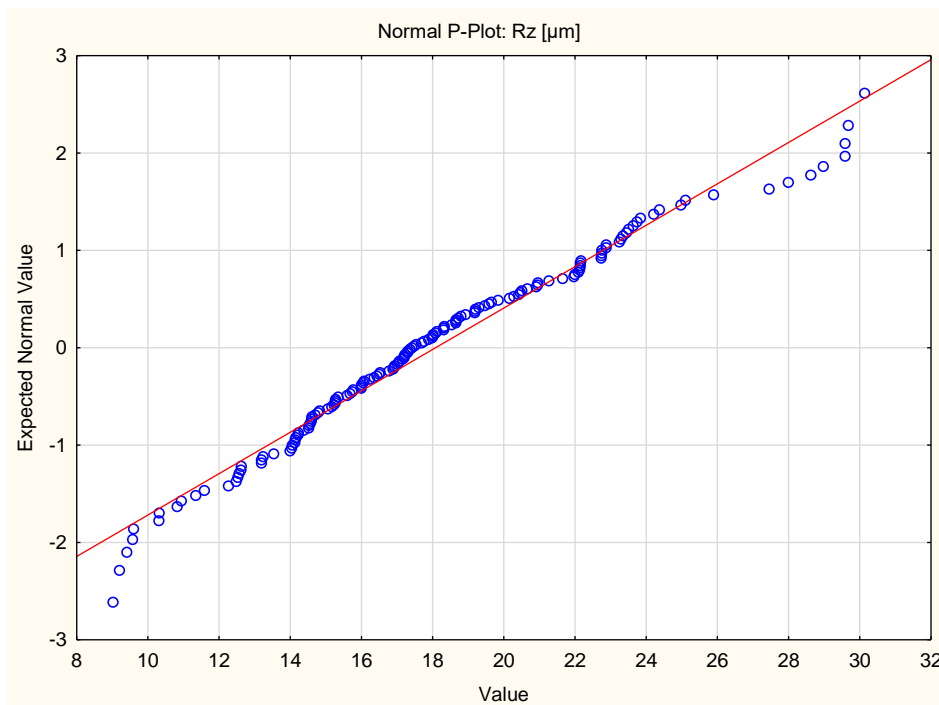
Příloha č. 8 Optické testy normality pomocí Q-Q grafu (parametr drsnosti Ra)



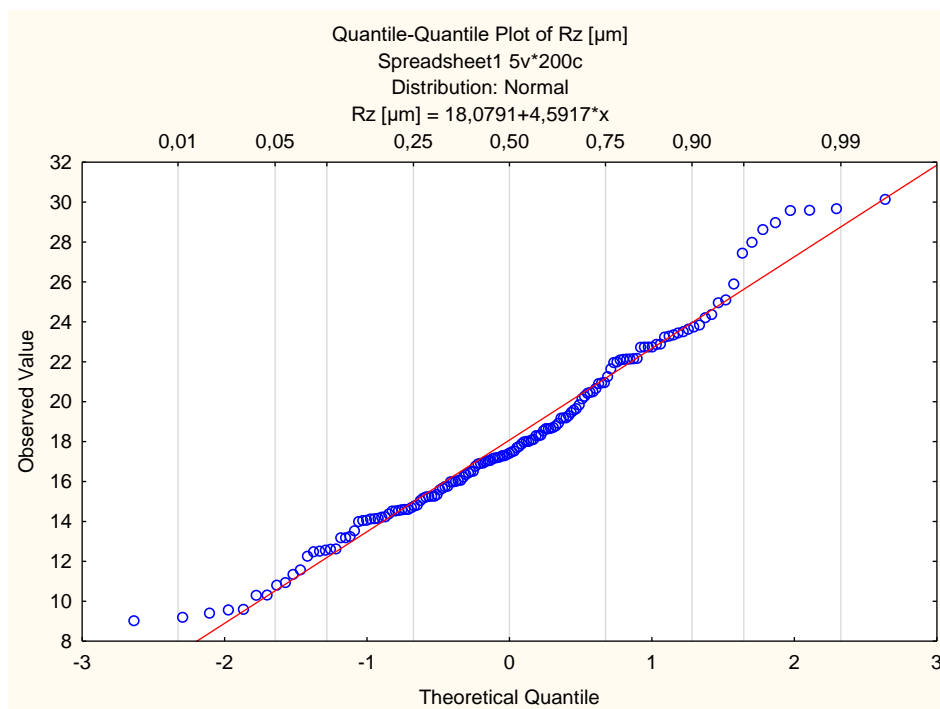
Příloha č. 9 Duncanův post-hoc test pro parametr drsnosti Ra

Číslo buňky	Stupeň zhuštění [%]	{1}	{2}	{3}	{4}	{5}
1	0		0,567117	0,742671	0,656444	0,031742
2	5	0,567117		0,399916	0,345852	0,007791
3	10	0,742671	0,399916		0,881502	0,058112
4	15	0,656444	0,345852	0,881502		0,064570
5	20	0,031742	0,007791	0,058112	0,064570	

Příloha č. 10 Optické testy normality pomocí NP grafu (parametr drsnosti Rz)



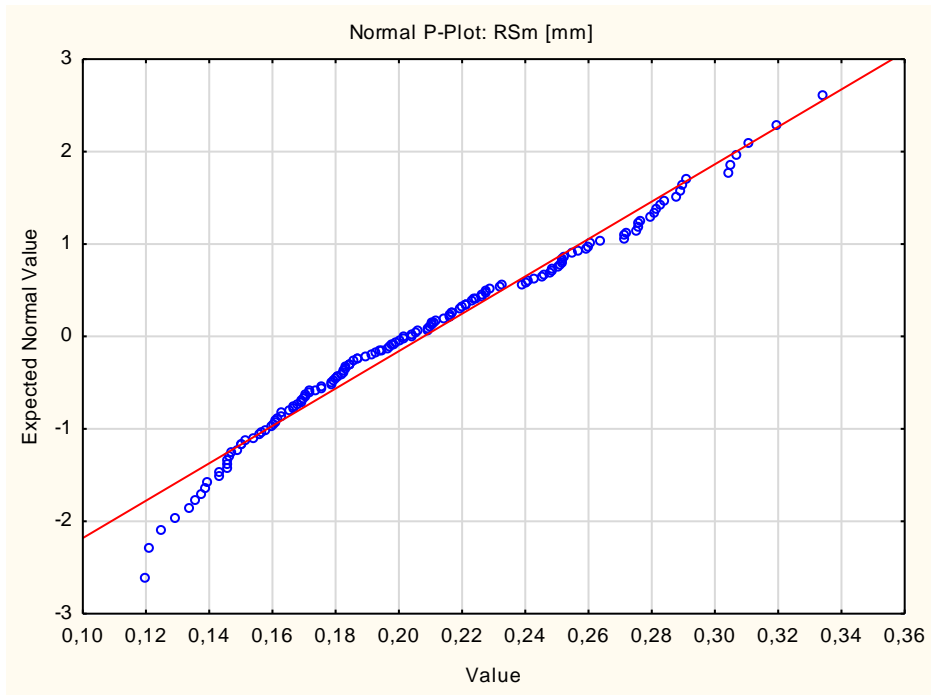
Příloha č. 11 Optické testy normality pomocí Q-Q grafu (parametr drsnosti Rz)



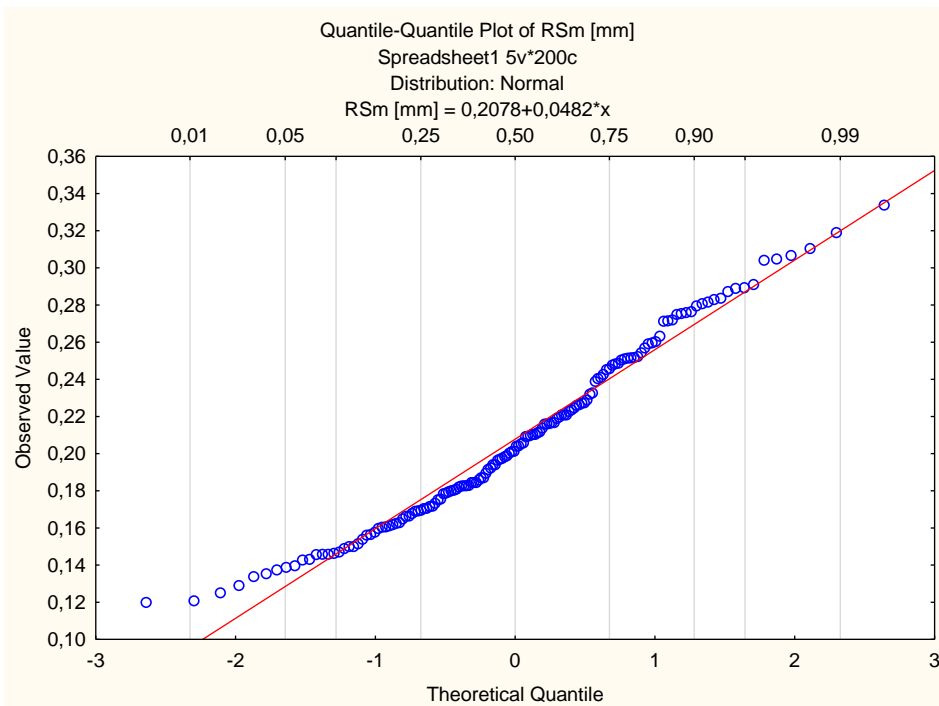
Příloha č. 12 Duncanův post-hoc test pro parametr drsnosti Rz

Číslo buňky	Stupeň zhuštění [%]	{1}	{2}	{3}	{4}	{5}
1	0		0,465553	0,325988	0,300686	0,007725
2	5	0,465553		0,105131	0,095333	0,000812
3	10	0,325988	0,105131		0,988548	0,072474
4	15	0,300686	0,095333	0,988548		0,086816
5	20	0,007725	0,000812	0,072474	0,086816	

Příloha č. 13 Optické testy normality pomocí NP grafu (parametr drsnosti RSm)



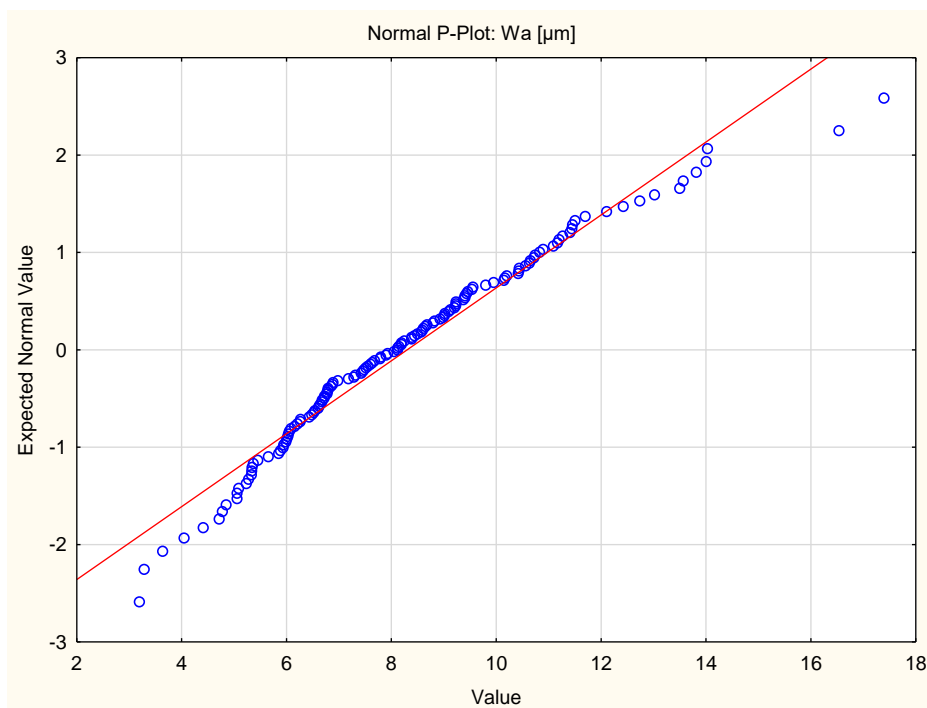
Příloha č. 14 Optické testy normality pomocí Q-Q grafu (parametr drsnosti RSm)



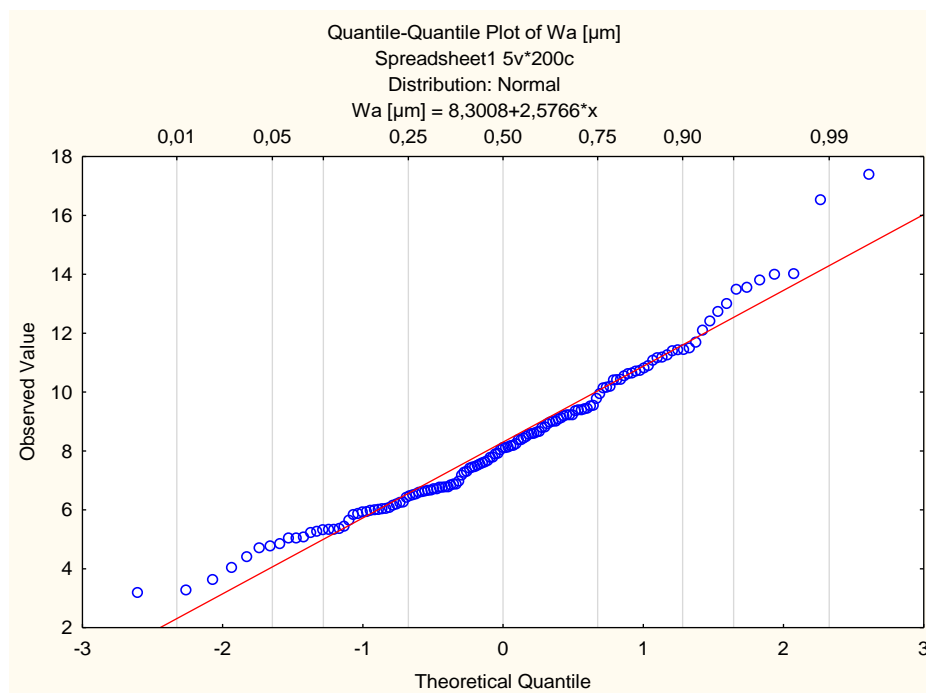
Příloha č. 15 Duncanův post-hoc test pro parametr drsnosti RSm

Číslo buňky	Stupeň zhuštění [%]	{1}	{2}	{3}	{4}	{5}
1	0		0,847205	0,009103	0,000506	0,000030
2	5	0,847205		0,011617	0,000799	0,000052
3	10	0,009103	0,011617		0,351141	0,111925
4	15	0,000506	0,000799	0,351141		0,452322
5	20	0,000030	0,000052	0,111925	0,452322	

Příloha č. 16 Optické testy normality pomocí NP grafu (parametr vlnitosti Wa)



Příloha č. 17 Optické testy normality pomocí Q-Q grafu (parametr vlnitosti Wa)



Příloha č. 18 Duncanův post-hoc test pro parametr vlnitosti Wa

Číslo buňky	Stupeň zhuštění [%]	{1}	{2}	{3}	{4}	{5}
1	0		0,720499	0,004196	0,004780	0,000146
2	5	0,720499		0,009972	0,010151	0,000492
3	10	0,004196	0,009972		0,909067	0,331640
4	15	0,004780	0,010151	0,909067		0,309604
5	20	0,000146	0,000492	0,331640	0,309604	

Příloha č. 19 Tloušťkovací frézka SCM s630 class



Příloha č. 20 Měření a vážení zkušebních vzorků



Příloha č. 21 Zhušřování vzorků na hydraulickém lise TOS Rakovník

